



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**Estudio de la dispersión geoquímica secundaria de los
metales base en los volcánicos del Neógeno, en la
microcuenca Chahuarma – Huancavelica, Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

AUTOR

Gerardo Adolfo TRELLES VÁSQUEZ

ASESOR

Jorge Eduardo CHIRA FERNANDEZ

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Trelles, G. (2021). *Estudio de la dispersión geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	https://orcid.org/0000-0002-3395-0323
DNI o pasaporte del autor	47146064
Código ORCID del asesor	https://orcid.org/0000-0002-51949940
DNI o pasaporte del asesor	07342254
Grupo de investigación	-
Agencia financiadora	-
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lugar (Distritos de Pilpichaca y Lircay, provincias de Huaytará y Angaraes – Región Huancavelica). Coordenadas geográficas (13°10'45" S, 74°42'35" O).
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017-2020
Disciplinas OCDE	1.05.04 -- Geoquímica, Geofísica http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

De acuerdo a la Resolución Rectoral N° 01242-R-20, usando la plataforma virtual Google Meet el día jueves 14 de enero del año 2021 siendo las 20:00 horas, y luego de instalar el acto académico protocolar el Vicedecano Dr. Alfonso Alberto Romero Baylon en la presencia de los miembros del Jurado Calificador:

Ing. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA	(Presidente de Jurado)
Ing. ROSA JULIA MEDINA SANDOVAL	(Miembro de Jurado)
Ing. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO	(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico virtual público de colación de la Tesis del Bach. **GERARDO ADOLFO TRELLES VÁSQUEZ**, quien sustentará virtualmente la Tesis titulada: **"ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DE LOS METALES BASE EN LOS VOLCÁNICOS DEL NEÓGENO, EN LA MICROCUENCA CHAHUARMA - HUANCAMELICA, PERÚ**, su asesor fue el docente Mg. Jorge Chira Fernández, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la sustentación virtual respectiva, plantearon virtualmente al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas:

A SATISFACCIÓN DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación virtual, cuyo resultado fue:

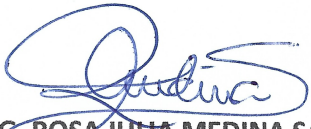
APROBADO POR UNANIMIDAD CON NOTA DE (17) DIECISIETE

Habiendo sido aprobada la Sustentación virtual de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO** al Bach. **GERARDO ADOLFO TRELLES VÁSQUEZ**

Siendo las 21:05 horas se dio por concluido el acto académico virtual, expidiéndose dos (02) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 14 de enero de 2021


ING. PEDRO ANTONIO OLIVARES BALLENA
PRESIDENTE DE JURADO


ING. ROSA JULIA MEDINA SANDOVAL
MIEMBRO DE JURADO


ING. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO
MIEMBRO DE JURADO

RESUMEN

El presente estudio se realizó con el objetivo de determinar la dispersión geoquímica secundaria de los metales base (Ag-Cu-Pb-Zn) en los Volcánicos del Neógeno de la microcuenca Chahuarma, la cual abarca las provincias de Huaytará y Angaraes, región Huancavelica - Perú. Para ello se analizó la composición química de 46 muestras de sedimentos, obteniendo valores de 32 elementos químicos, lo que permitió definir distribuciones, patrones y asociaciones geoquímicas secundarias de los metales base. Los resultados indican que los metales base en los volcánicos del Neógeno presentan distribución bimodal y no normal, es por ello que se decidió dividir esta unidad en dos: “Volcánicos del Plioceno” y “ Volcánicos del Mioceno”, los cuales poseen una distribución lognormal en esta zona, por otro lado la correlación de Pearson mostró correlaciones interesantes como son Pb – Hg, Ag – Cu, Ag – Zn y Cu - Zn que indican ambiente de mineralización epitermal de baja sulfuración; mientras tanto el análisis multivariado mostró las siguientes asociaciones geoquímicas Mn – Co – Zn – Y – N i- Be - Sc, Sr – As – Pb - Sc, Sb – Ag – Hg – Cd; entre otras. Por último, se determinó que la mayor concentración de estos metales se encuentra en la parte alta de la microcuenca, debido a que en este sector se encuentran rocas de los Grupos Pucara y Mitu, las cuales tienen un valor de fondo de metales base mucho más alto.

Este estudio tuvo como finalidad dejar un aporte científico – económico, ya que el área de estudio está influenciada por yacimientos minerales metálicos de importancia nacional. Sin embargo, no se halló concentraciones significativas de estos metales; aunque es de suma relevancia mencionar que, si se hallaron asociaciones geoquímicas que indican ambiente de mineralización epitermal de baja sulfuración. Esto nos deja como conclusión que hay que seguir explorando esta área, pero con más detalle, ya que esta investigación no descarta su potencial económico.

Dedico este trabajo a mis padres, Nancy y Gerardo, por haberme guiado, apoyado y aconsejado a lo largo de toda mi carrera y mi vida en general; por ser grandes personas a las que siempre he admirado por su temple, fortaleza, entrega y perseverancia. De igual manera a mis hermanos, que estuvieron en los buenos y malos momentos, ya que, sin mi familia a mi lado, nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Jorge Chira, Coordinador de Geología y Laboratorio del INGEMMET, y asesor de este trabajo, por haberme orientado y aconsejado para desarrollar esta investigación; al Ing. Luis Vargas, Director de Laboratorio de INGEMMET, por haberme permitido trabajar en su proyecto y haberme brindado valiosas recomendaciones durante el desarrollo de esta tesis; al Mg. Hugo Rivera, docente de la UNMSM por sus sugerencias y apoyo al inicio de este trabajo y en general a todos los colegas geólogos del INGEMMET que con pequeños aportes y consejos ayudaron a culminar esta investigación.

INDICE

RESUMEN	2
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	11
1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	12
1.1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.1.4. VARIABLES	13
1.1.5. HIPÓTESIS.....	13
1.1.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1.7. MATRIZ DE CONSISTENCIA	15
CAPITULO II: GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	16
2.1. UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	16
2.2. ACCESIBILIDAD	16
2.3. HIDROGRAFÍA	19
2.4. CLIMA.....	19
2.5. GEOMORFOLOGÍA	20
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	25
3.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	25
3.2. BASES TEÓRICAS	27
3.2.1. CARÁCTER GEOQUIMICO DE LOS METALES BASE.....	27
3.2.2. DISPERSIÓN GEOQUÍMICA.....	34
3.2.3. MOVILIDAD GEOQUÍMICA.....	35
3.2.4. ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS	42
3.2.5. CORRELACIÓN DE PEARSON	43
3.2.6. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	45
3.3. GLOSARIO.....	46
CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA REGIONAL.....	48
4.1. ESTRATIGRAFÍA.....	48
4.1.1. PALEOZOICO INFERIOR.....	48
4.1.2. CARBONÍFERO - PÉRMICO	49
4.1.3. TRIÁSICO – JURÁSICO.....	51
4.1.4. PALEÓGENO – NEÓGENO	52

4.1.5. DEPÓSITOS CUATERNARIOS	56
4.2. ROCAS ÍGNEAS	59
4.2.1. ROCAS INTRUSIVAS	59
4.2.2. ROCAS SUBVOLCÁNICAS	60
4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL	61
4.3.1. PRINCIPALES ESTRUCTURAS	62
4.4. GEOLOGÍA ECONÓMICA	64
CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	68
5.1. UNIDAD DE ANÁLISIS	68
5.2. POBLACIÓN	69
5.3. MUESTRA.....	69
5.4. PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA.....	69
5.5. MUESTREO DE SEDIMENTOS ACTIVOS DE CORRIENTE	70
5.6. PROCESAMIENTO ANALÍTICO	73
5.6.1. ATAQUE QUÍMICO	73
5.6.2. METODOS ANALÍTICOS	74
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	77
6.1. ESTADÍSTICA DE LOS METALES BASE EN EL DOMINIO LITOESTRATIGRÁFICO VOLCÁNICOS DEL NEÓGENO.....	78
6.2. CORRELACIÓN BIVARIADA.....	94
6.3. ANALISIS MULTIVARIADO	99
6.4. PATRONES DE DISPERSIÓN GEOQUÍMICA	108
CAPÍTULO VII: DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE LOS METALES BASE	113
7.1. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE LA PLATA	115
7.2. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE COBRE	117
7.3. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL PLOMO	119
7.4. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL ZINC.....	121
CONCLUSIONES.....	123
RECOMENDACIONES.....	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126

RELACION DE FIGURAS

- Figura 1** Mapa de ubicación del área de estudio.
- Figura 2** Mapa de la hidrografía del área de estudio.
- Figura 3** Mapa de distribución de climas del área de estudio.
- Figura 4** Mapa geomorfológico del área de estudio.
- Figura 5** Movilidad en el ambiente secundario como una función del potencial iónico.
- Figura 6** Capas rojas del Grupo Mitu subyaciendo a la Formación Chahuarma, localidad de Ccollpapata, vista hacia NE.
- Figura 7** Afloramiento de la formación Apacheta suprayaciendo a las capas rojas del Grupo Mitu.
- Figura 8** Afloramiento de la Formación Chahuarma, cerca de la ribera del río Condorpaccha.
- Figura 9** Afloramiento de tobas riolíticas de la Formación Portuguesa, vista hacia el NE.
- Figura 10** Mapa geológico de la microcuenca Chahuarma.
- Figura 11** Columna estratigráfica de los alrededores de la microcuenca Chahuarma.
- Figura 12** Columna estratigráfica de los alrededores de la microcuenca Chahuarma.
- Figura 13** Porcentaje de aporte económico de los recursos metálicos finos de los **13** yacimientos ubicados en la cercanía de la zona de estudio.
- Figura 14** Mapa de la geología económica alrededor del área de estudio.
- Figura 15** Mapa de diseño de muestreo en el área de estudio.
- Figura 16** Toma de información (coordenadas, datos geológicos, etc.) en estación de muestreo.
- Figura 17** Zonas de menor energía, propicias para la acumulación de sedimentos y adecuadas para la recolección de muestras.
- Figura 18** Tamizado del sedimento en un tamiz n°30, donde pasa el sedimento fino.
- Figura 19** Equipo de espectroscopia de masas de plasma acoplado ICP-MS.
- Figura 20** a) Histograma de frecuencias del Cu, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Cu para las dos subpoblaciones ($VM^1=1$ y $VP^2=2$) y la población total (VN^3) y c) Gráfico de normalidad del Cu.
- Figura 21** a) Histograma de frecuencias del Zn, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Zn para las dos subpoblaciones ($VM^1=1$ y $VP^2=2$) y la población total (VN^3) y c) Gráfico de normalidad del Zn.

- Figura 22** a) Histograma de frecuencias de la Ag, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas de la Ag para las dos subpoblaciones ($VM^1=1$ y $VP^2=2$) y la poblacion total (VN^3) y c) Gráfico de normalidad de la Ag.
- Figura 23** a) Histograma de frecuencias del Pb, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Pb para las dos subpoblaciones ($VM^1=1$ y $VP^2=2$) y la poblacion total (VN^3) y c) Gráfico de normalidad del Pb.
- Figura 24** a) Histograma de frecuencias del Cu en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Cu en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Cu en los volcánicos del Plioceno.
- Figura 25** a) Histograma de frecuencias del Zn en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Zn en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Zn en los volcánicos del Plioceno.
- Figura 26** a) Histograma de frecuencias de la Ag en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas de la Ag en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad de la Ag en los volcánicos del Plioceno.
- Figura 27** a) Histograma de frecuencias del Pb en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Pb en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Pb en los volcánicos del Plioceno.
- Figura 28** a) Histograma de frecuencias del Cu en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas del Cu en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad del Cu en los volcánicos del Mioceno.
- Figura29** a) Histograma de frecuencias del Zn, b) Diagrama de cajas del Zn en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad del Zn en los volcánicos del Mioceno.
- Figura 30** a) Histograma de frecuencias de la Ag en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas de la Ag en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad de la Ag en los volcánicos del Mioceno.
- Figura 31** a) Histograma de frecuencias del Pb en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas del Pb en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad del Pb en los volcánicos del Mioceno.
- Figura 32** Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Rio Condorpaccha.
- Figura 33** Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Rio Chicchina.
- Figura 34** Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Rio Supaymayo.
- Figura 35** Mapa monoelemental de Plata.
- Figura 36** Mapa monoelemental de Cu.
- Figura 37** Mapa monoelemental de Pb.

Figura 38. Mapa monoelemental de Zn.

RELACION DE TABLAS

- Tabla 1** Propiedades físicas y químicas de los metales base.
- Tabla 2** Concentración promedio en ppm de metales base en rocas sedimentarias e ígneas.
- Tabla 3** Movilidad de los elementos de acuerdo al pH y Eh
- Tabla 4** Clasificación de los principales productos sedimentarios.
- Tabla 5** Agrupaciones de elementos concentrados en las barreras geoquímicas.
- Tabla 6** Recursos metálicos finos alrededor de la subcuenca Chahuarma.
- Tabla 7** Numero de muestras utilizadas en el estudio.
- Tabla 8** Límites de detección ICP-MS para muestras de sedimento.
- Tabla 9** Poblaciones estadísticas de la microcuenca Chahuarma.
- Tabla 10** Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcánicos del Neógeno.
- Tabla 11** Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 12** Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcánicos del Mioceno.
- Tabla 13** Matriz de correlación de Pearson del dominio litoestratigráfico Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 14** Correlación de Pearson de los metales base de los Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 15** Correlación de Pearson de los metales base de los Volcánicos del Mioceno.
- Tabla 16** Matriz de correlación de Pearson del dominio litoestratigráfico Volcánicos del Mioceno.
- Tabla 17** Matriz de comunalidades de los Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 18** Varianza total explicada de los Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 19** Matriz de componentes rotados de los Volcánicos del Plioceno.
- Tabla 20** Matriz de comunalidades de los Volcánicos del Mioceno.
- Tabla 21** Matriz de varianza total explicada de los Volcánicos del Mioceno.

- Tabla 22** Matriz de componentes rotados de los Volcánicos del Mioceno.
- Tabla 23** Numero de muestras utilizadas para el cálculo de los umbrales geoquímicos.
- Tabla 24** Umbrales geoquímicos de los metales base en los dominios litoestratigráficos estudiados.
- Tabla 25** Anomalías geoquímicas de metales base en la microcuenca Chahuarma.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un ambiente de altas temperaturas y presiones (ambiente endógeno) se genera una dispersión primaria de los elementos químicos, en este entorno dicha dispersión se produce principalmente por procesos magmáticos, metamórficos, y por afinidad geoquímica. Por su parte, la dispersión secundaria se produce en ambientes superficiales de bajas temperaturas y presiones (ambiente exógeno), donde los principales factores de dispersión son los procesos de meteorización y erosión. Partiendo de este aspecto, se ha visto necesario realizar un estudio de dispersión secundaria de metales base en la microcuenca Chahuarma, ya que esta zona se encuentra rodeada en un radio de 20 km de yacimientos epitermales de baja e intermedia sulfuración y están alojados principalmente en rocas volcánicas del Neógeno, los cuales son ricos en menas de Ag, Cu, Pb y Zn.

Es imperativo resaltar que, en la microcuenca Chahuarma, no se ha realizado ningún estudio de este tipo hasta la fecha, razón por la cual se optó por resolverlo en la presente investigación. Sin embargo, existen estudios geológicos previos que abarcan esta zona, como son los siguientes “*Geología del distrito minero de Huachocolpa*” por Injoque, Valdivia y García en 1994, “*Geología del cuadrángulo de Huachocolpa*” por Morche, La Torre, De La

Cruz y Cerrón en 1996, *“Geología del cuadrángulo de Huachocolpa a escala 1:50,000”* por Valdivia y Raymundo en el 2003, *“Análisis textural y petrográfico de las ignimbritas de la Formación Chahuarma”* por Vasquez en el 2003 y *“El distrito polimetálico de Huachocolpa”* por Pérez-Puig e Iparraguirre en el 2013.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la dispersión geoquímica secundaria de los metales base en el dominio litoestratigráfico: Volcánicos del Neógeno, así como también identificar las asociaciones y anomalías geoquímicas, limitando el estudio a los interiores de la microcuenca Chahuarma, la cual abarca en las provincias de Huaytará y Angaraes, región Huancavelica. Para ello es necesario identificar la composición geoquímica de las rocas aflorantes, así como también de los sedimentos activos de corriente de la zona de estudio, para que de esta manera se pueda representar, analizar e interpretar la información geoquímica obtenida.

1.1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

La siguiente investigación busca resolver las siguientes interrogantes:

- **Problema principal**

- ¿Cómo es la distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?

- **Problemas específicos**

- ¿De qué manera se asocian los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?
- ¿Cómo es el patrón geoquímico de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?

- ¿Cómo varían las concentraciones de metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?

1.1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

- **Objetivo principal**

- Determinar la distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.

- **Objetivos específicos**

- Identificar la asociación de los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
- Determinar el patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
- Determinar la variación del contenido de metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.

1.1.4. VARIABLES

- **Variable independiente**

- Rocas volcánicas del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma.

- **Variable dependiente**

- Dispersión geoquímica secundaria de los metales base.

1.1.5. HIPÓTESIS

- **Hipótesis principal**

- La distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno es de carácter normal, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.

- **Hipótesis específicas**

- Existe relación geoquímica de los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
- Existe un patrón de dispersión geoquímica secundaria definido en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
- El contenido de metales base varía en toda la extensión de los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.

1.1.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El estudio de la dispersión geoquímica secundaria de los metales base en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica, se realiza con la intención de confirmar o descartar si esta área presenta ocurrencias de minerales metálicos.

Este estudio brinda gran apoyo a la actividad de exploración minera, principalmente en las regiones Huancavelica y Ayacucho, donde existe poco desarrollo de esta. Así como también servirá como precedente para un estudio de línea base geoquímica de los sedimentos del área en cuestión, que esencialmente puede ser utilizado por profesionales que anhelan el cuidado de los ecosistemas montañosos del país.

El actual estudio contribuye significativamente en el área de las geociencias, puesto que comparte información veraz, métodos estadísticos y geoquímicos adecuadamente explicados, los cuales podrán ser usados por estudiantes de las distintas ramas de la Geología, con el fin de realizar investigaciones de todo tipo y nivel.

Todo esto aporta nuevos conocimientos teórico-prácticos sobre el comportamiento geoquímico secundario de los metales base presentes en los sedimentos activos de quebrada,

cuya unidad de aporte perteneció a un ambiente primario correspondiente a un vulcanismo de edad neógena.

1.1.7. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Matriz de consistencia			
	Problema	Objetivos	Hipótesis
Principal	¿Cómo es la distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?	Determinar distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.	La distribución geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno es de carácter normal, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
Específicos	¿De qué manera se asocian los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?	Identificar la asociación de los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.	Existe relación geoquímica de los metales base con otros elementos trazas en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
	¿Cómo es el patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?	Determinar el patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.	Existe un patrón de dispersión geoquímica secundaria definido en los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.
	¿Cómo varían las concentraciones de metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica?	Determinar la variación de las concentraciones de metales base en los volcánicos del Neógeno en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.	Las concentraciones de metales base varía en toda la extensión de los volcánicos del Neógeno, en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica.

CAPITULO II: GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de la microcuenca Chahuarma se encuentra en la región sur central del país y está comprendida entre las coordenadas: $13^{\circ} 00'$ - $13^{\circ} 20'$ latitud sur y $74^{\circ} 34'$ - $74^{\circ} 55'$ longitud Oeste. Se ubica en el cuadrángulo 27n (cuadrángulo de Huachocolpa). Está en un rango de altitud entre los 3600 y 5000 m.s.n.m. El área de estudio abarca una superficie de 550 Km² aproximadamente.

De acuerdo a la división política del país, el área de estudio se encuentra en el departamento de Huancavelica, en las provincias de Huaytará y Angaraes, en los distritos de Lircay y Pilpicacha y abarca las comunidades de: Yahuarcocha, Tunaccorcco, Ochisca, Antarajira, Maraypampa, Puquiopata, Urpay, Paria, Polvera, Chahuarma, Quilcapata, Ancomarca, entre otras (Figura 1).

2.2. ACCESIBILIDAD

El acceso a la zona de estudio se logra por dos rutas bien marcadas, una de estas, la carretera Central y la otra la vía Los Libertadores (Figura 1). La carretera Central que une Lima – Huancayo – Lircay facilita el acceso al área por el sector noroeste del cuadrángulo de Huachocolpa.

La vía Los Libertadores que va a través del valle del río Pisco inicia en el Km 233 de la carretera Panamericana sur. Esta vía conduce hasta Ayacucho pasando por Huaytará y Pilpicacha; atravesando el cuadrángulo de Huachocolpa por la parte Suroeste a Sureste.

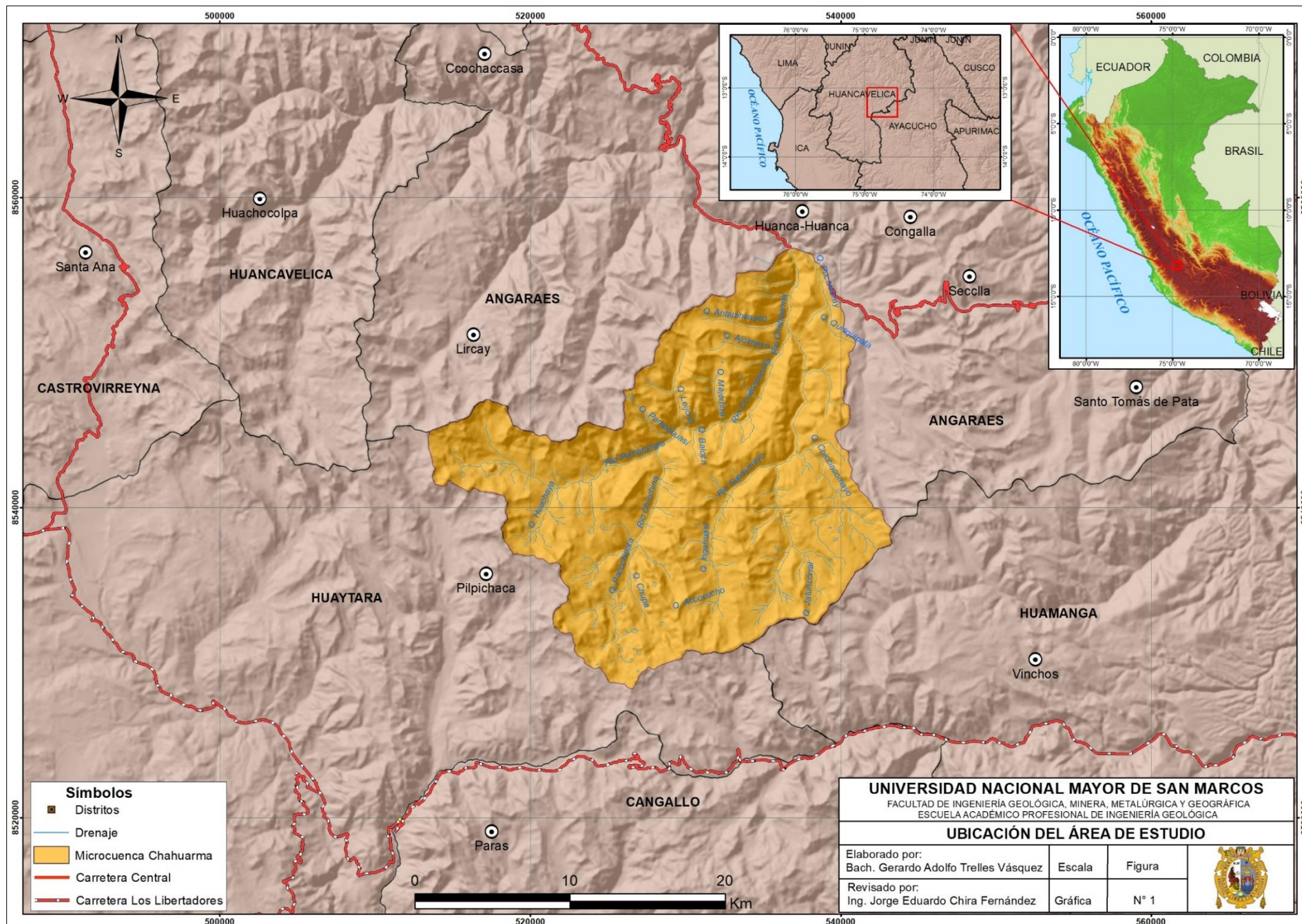


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

2.3. HIDROGRAFÍA

En esta cuenca nacen ríos cuyas aguas discurren con dirección al Océano Atlántico, donde el curso fluvial más importante es el río Chahuarma siendo sus aguas de escorrentía provenientes de las precipitaciones pluviales en las partes altas (Figura 2). En el sector de Churiac están los ríos Jarimayo y Apacheta que son cabeceras del río Cachi en el departamento de Ayacucho, tributarios del río Mantaro perteneciente a la cuenca Amazónica.

En la parte noroeste está el río Ajohuarma cuyos afluentes son los ríos Cocanmayo, Supamayo, Yotora, Pircamayo y Carhuapata; cuyas aguas discurren también hacia el río Mantaro.

Según Morche et al. (1996) “El drenaje que determina el curso de los ríos es típico del sistema dendrítico lo que se denota principalmente en los ríos Huachocolpa, Ajohuama y en los diferentes riachuelos. Estos a su vez están controlados por lineamientos estructurales que constituyen zonas de debilidad” (p.9).

2.4. CLIMA

Usualmente el clima en esta zona es frío, a causa de la elevación en que se ubica la microcuenca Chahuarma. En el verano se observan pequeños cambios, propios de esta estación (Figura 3).

Los estudios realizados por Morche et al. (1996) indican que la temperatura media anual tiene como máxima 10°C a 12°C en los valles, y la temperatura mínima es de 5°C en las zonas altas.

Por otro lado, las precipitaciones pluviales son copiosas, aunque condicionadas al verano (diciembre – abril), estas están asociadas comúnmente a fuertes tormentas eléctricas. A

lo largo de los meses de mayo a septiembre, el tiempo de este sector se caracteriza por fuertes heladas, frecuentes sequías y vientos de gran velocidad; todo esto ocurre debido al brusco descenso de temperatura en las noches (Morche et al., 1996).

2.5. GEOMORFOLOGÍA

El relieve actual de la zona es producto de procesos tectónicos como compresión y extensión de la corteza terrestre, que provocan levantamientos o subsidencias; que a su vez son meteorizados y erosionados por agentes geodinámicos. Dichos agentes han modelado la microcuenca Chahuarma, dentro de la cual se pueden diferenciar 4 unidades geomorfológicas (Figura 4).

Cordilleras altas

Esta unidad la conforma una cadena de cerros escarpados cuyas cotas sobrepasan generalmente los 4800 m de altitud. En el área de estudio, como es evidente, se encuentra hacia los bordes de la microcuenca, denotando los sectores más altos.

Esta unidad se encuentra modelada sobre secuencias volcánicas cuya morfología está íntimamente relacionada a estructuras de la misma naturaleza como derrames, mesetas, domos, espinas y estructuras circulares (Morche et al., 1996).

Laderas y cumbres

Morche et al. (1996) indica que “esta unidad comprende los declives inmediatos al relieve cordillerano y constituye los flancos de los diferentes valles. Presenta pendientes diversas que generalmente oscilan entre 40° y 60°, estando en función de la litología dominante en el área” (p.13).

Altiplanicie

Esta morfología está presente en el sector oriental del área de estudio, al igual que las anteriores está controlada litológicamente por rocas volcánicas. Está conformada por una superficie subhorizontal debido a vastas coladas de lavas con pendientes de 5° a 10°. Se encuentra cortada por los ríos y quebradas de casi toda la microcuenca, las cuales han erosionado dicha plataforma dando escarpas verticales. (Morche et al., 1996)

Valles

Son formas de relieve negativo, es decir, depresiones y generalmente presentan formas de “V” y están ocupados por ríos permanentes (Morche et al., 1996). En la microcuenca Chahuarma se reconoce este tipo de relieve en la desembocadura del río Chahuarma en el río Ajohuarma.

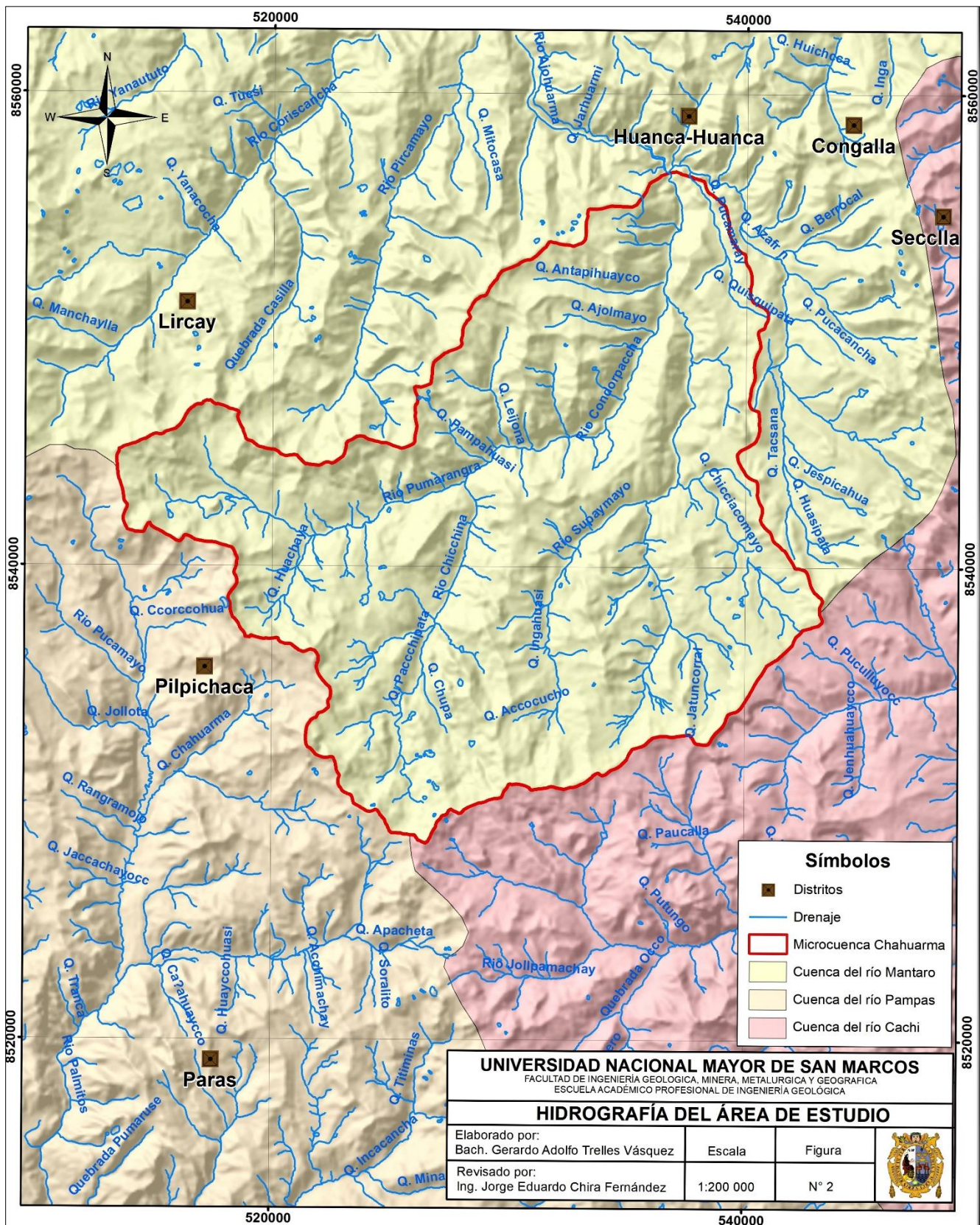


Figura 2. Mapa de la hidrografía del área de estudio.

**Tomado y modificado de Morche et al. (1996).*

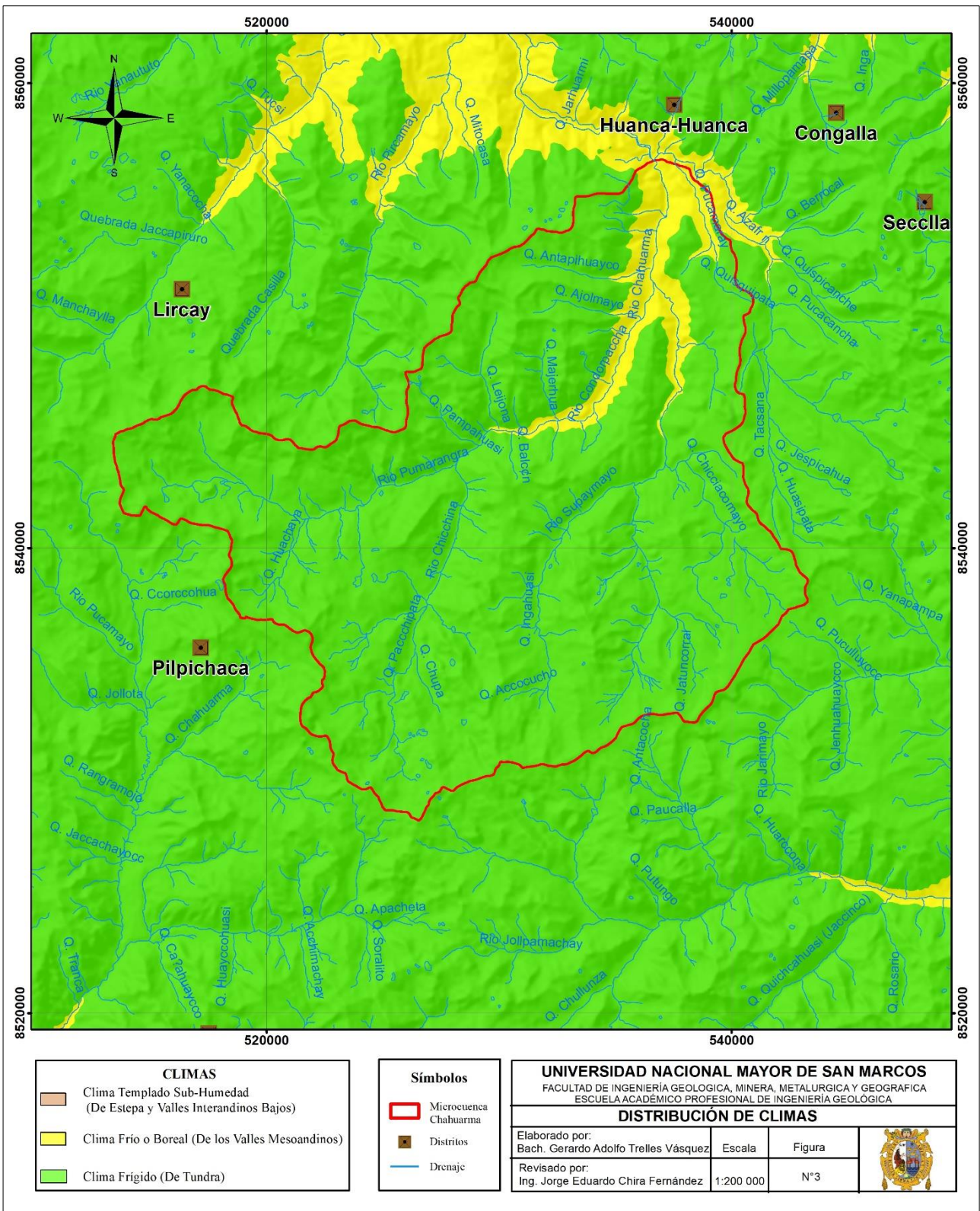


Figura 3. Mapa de distribución de climas del área de estudio.

**Tomado y modificado de Morche et al. (1996).*

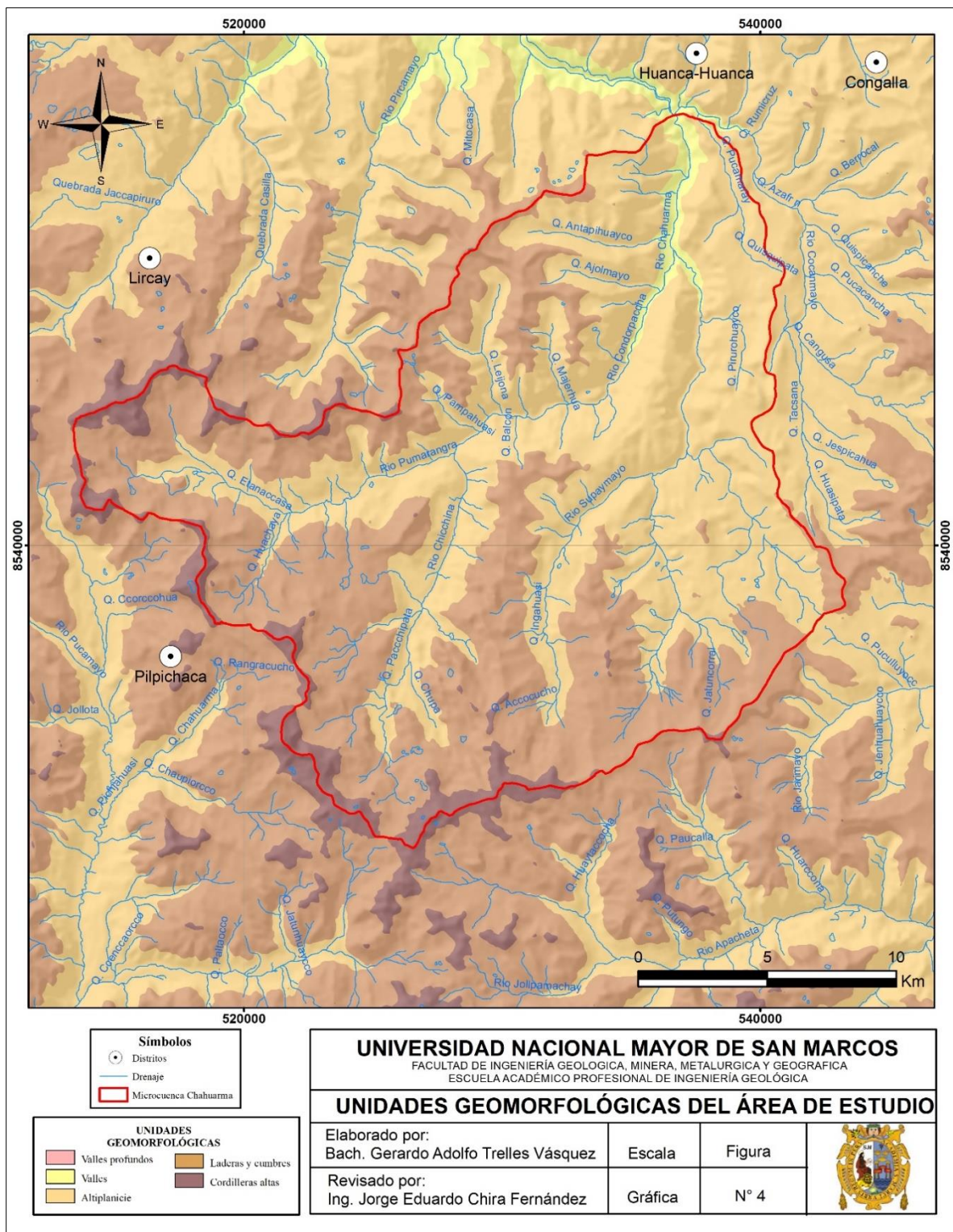


Figura 4. Mapa geomorfológico del área de estudio.

*Tomado y modificado de Morche et al. (1996)

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Perez-Puig e Iparraguirre (2006) en su artículo “**El distrito polimetálico de Huachocolpa, Huancavelica**” delimitan la mineralogía de este distrito minero, del cual se conoce limitada información. Estos autores describieron minerales microscópicamente y macroscópicamente, tanto de la mineralización, como de la roca caja. Se enfocaron en la descripción de la mineralogía de las minas Palomo y Esperanza, donde recalcaron la presencia de esfalerita, galena, estibina y changoita; como minerales principales.

Vásquez (2003) en su tesis “**Análisis textural y petrográfico de las ignimbritas de la Formación Chahuarma**” clasifica granulométrica y genéticamente los distintos depósitos piroclásticos del miembro inferior de la Formación Chahuarma. Con este objetivo, realizó análisis de tamaño de grano que se consiguieron por medio de tamizado y pesado de los sedimentos de cada una de las mallas utilizadas. Los resultados fueron procesados estadísticamente con histogramas y curvas acumulativas.

La autora, caracterizó a los depósitos piroclásticos de acuerdo la variabilidad granulométrica de estos y los etiqueto de la siguiente manera: tobas de cenizas, tobas lapilli y tobas de brechas.

Valdivia y Raymundo (2003) elaboraron la “**Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huachocolpa (27-n) a escala 1:50 000**” y parten del estudio del cuadrángulo de Huachocolpa cartografiado a escala 1:100 000 Por Morche y colaboradores en el año 1996. En esta, comentan que teniendo en cuenta los nuevos estudios geológicos realizados en la zona (sobre todo estudios de exploración minera) hasta la fecha de trabajo, fue necesario la elaboración de un mapa geológico a escala 1:50 000; ya que es indispensable actualizar la información geológica con el fin de afinar aspectos estructurales, tectónicos y mineralógicos para el óptimo aprovechamiento de los recursos naturales.

Morche *et al.* (1996) al elaborar el boletín N°63 “**Geología del cuadrángulo de Huachocolpa**” de la serie A del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico “Carta Geológica Nacional” elaboran y explican la columna estratigráfica del cuadrángulo de Huachocolpa (hoja 27-n), la cual comprende secuencias de rocas sedimentarias y volcánicas que en edad van desde el Paleozoico hasta el Cuaternario reciente. Las secuencias más antiguas son las lutitas del Grupo Excelsior del Devónico, por otro lado, los clastos más recientes pertenecen al Cuaternario Pleistocénico. Destaca el distrito minero de Huachocolpa, una de las áreas mineras más importantes del centro del Perú, cuya mineralización posiblemente esté relacionada al ascenso de fluidos hidrotermales

producto del emplazamiento de plutones de naturaleza félsica del Plioceno. La intensa erosión de las estructuras volcánicas ante todo en el sector Oeste (Formación Apacheta) posibilita el ingreso a niveles inferiores con mineralizaciones metálicas como son: Pb, Ag, Zn, Cu (\pm Au).

Injoque *et al.* (1994) en su artículo “**Geología del distrito minero de Huachocolpa**” revisaron la geología de Huachocolpa, así como también realizaron investigaciones con el fin de solucionar requerimientos mineros de la zona, enfocándose principalmente en los aspectos estructurales y mineralógicos relacionados con la génesis de yacimientos minerales. Este trabajo se considera de carácter preliminar y debe ser aplicado como guía para próximos trabajos exploratorios en la zona.

3.2. BASES TEÓRICAS

3.2.1. CARÁCTER GEOQUÍMICO DE LOS METALES BASE

El comportamiento químico del cobre, la plata y el zinc no es sencillo, ya que son metales de transición. Esto se debe a su polivalencia y a su alta electronegatividad, donde el enlace covalente tiene un rol importante (ver tabla 1). Los enlaces con el O en óxidos y silicatos son principalmente iónicos, sin embargo, el enlace con otros no metales, como el S, en la mayoría de casos es covalente. Un parámetro que vuelve complejos a estos metales, es la geometría de los orbitales *d*, debido a que es muy direccional y así da las preferencias específicas sobre la geometría de los aniones de coordinación (White, 2003).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de los metales base.

Elemento	Número atómico	Peso atómico	Valencias	Electronegatividad	Potencial de ionización (eV)	Densidad (g/cc)	Radio atómico (pm)	Punto de fusión (K)
Ag	47	107.9	+2, +1	1.9	7.57	10.53	134	961
Cu	29	63.5	+2, +1	1.9	7.72	8.96	128	1357
Zn	30	65.3	+2	1.6	9.39	7.133	133	693
Pb	82	207.2	+4, +2	1.8	7.41	11.350	171	601

**Tomada de Faure (1991).*

Por otro lado, la solubilidad de los metales base es muy variable y depende del estado de oxidación y la cantidad de aniones con los que estos sean capaces de formar complejos de coordinación solubles. Respecto al comportamiento en magmas, se ha determinado que son levemente incompatibles (la concentración del elemento es mayor en la fase fundida), sin embargo, su comportamiento exacto normalmente depende de la composición de ambas fases: sólida y fundida. Estos metales, de acuerdo la clasificación de Goldschmidt, son de carácter siderófilo (Cu) y calcófilos (Ag, Cu y Zn). Por otra parte, el plomo, según Goldschmidt, es calcófilo con tendencia siderófila. También es un elemento muy volátil; a lo largo del rango de condiciones naturales redox, posee valencia +2. Su solubilidad es bastante baja en la gran mayoría de condiciones, aunque es capaz de desarrollar complejos fuertes con gases como el cloro y puede transportarse velozmente en soluciones metamórficas e hidrotermales. En los sistemas ígneos es ligeramente incompatible, como podría esperarse por su radio iónico y carga (White, 2003).

Tabla 2. Concentración promedio en ppm de metales base en rocas sedimentarias e ígneas

Elemento	Ultramáficas	Basaltos	Granitos de ↑Ca ¹	Granitos de ↓Ca ²	Lutitas	Areniscas	Rocas carbonatadas
Ag	0.05	0.11	0.05	0.03	0.07	0.01	0.01
Cu	15	94	30	10	45	-	4
Zn	40	118	60	39	95	16	20
Pb	0.5	7	15	19	20	7	9

**Tomada de Faure (1991).*

1: Alto contenido de calcio.

2: Bajo contenido de calcio.

A continuación se describe la geoquímica, la distribución en la corteza terrestre, el comportamiento en superficie y los principales minerales de los metales base.

3.2.1.1. GEOQUÍMICA PRIMARIA DE LA PLATA

Estudios realizados por Goldschmidt (1937) demuestran que la plata se concentra en las partes sulfuradas de los meteoritos, esto constituye una prueba de su carácter calcófilo típico.

En la litosfera superior, la plata se presenta predominantemente junto con el azufre y en menor parte con el selenio, formando diversos sulfuros y seleniuros. Asimismo, la plata forma muchos telurios y sulfosales, estas últimas fundamentalmente con el cobre, germanio, estaño, plomo y manganeso. Al igual que el oro, la plata tiende a concentrarse de manera sencilla en los sulfuros separados en las primeras fases de la diferenciación magmática (por su carácter calcófilo), sin embargo, su mayor concentración se da en los últimos productos magmáticos. Las fases pegmatíticas e hidrotermales son los fluidos

más importantes para el transporte de este metal durante la cristalización magmática (Rankama & Sahama, 1962).

Según Vasallo (2008) los minerales menas más importantes de plata son: argentita Ag_2S , estefanita Ag_5SbS_4 pirargirita Ag_3SbS_3 (59.8%), proustita Ag_3AsS_3 , polibasita $8(\text{Ag,Cu})_2\text{S}\cdot\text{Sb}_2\text{S}_3$; en ese orden.

3.2.1.2. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DE LA PLATA EN EL PERÚ

Según el “Atlas Geoquímico del Perú”, elaborado por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en el año 2017, el rango de concentraciones de plata en sedimentos activos de corriente en el Perú va desde valores menores a 0.01 ppm hasta los 500 ppm e indica un umbral regional promedio de 0.8 ppm. Las más importantes concentraciones han sido reportadas en los sectores centro y sur del país, donde destacan las anomalías de Miyo (60 ppm – San Mateo, región Lima), Trapiche (69 ppm – Corani, región Puno) y Tacuni (500 ppm – Ananea, región Puno).

3.2.1.3. GEOQUÍMICA PRIMARIA DEL COBRE

Goldschmidt (1937) clasifica al cobre como un metal de carácter calcófilo con tendencia siderófila. Está demostrado que este metal presenta gran afinidad con el azufre, por no decir que es una de las principales menas dentro de los sulfuros, sin embargo, también forma parte de minerales de hierro y platino, de allí su carácter siderófilo (Rankama & Sahama, 1962).

En la evolución magmática el comportamiento geoquímico del cobre está controlado por los coeficientes de partición entre minerales silicatados, óxidos de Fe-Ti, sulfuros y el magma en general. Los coeficientes de partición sugieren que el cobre es altamente incompatible con la fase silicatada, incompatible a moderadamente compatible en la fase de óxidos de Fe-Ti, y altamente compatible en sulfuros (Liu & Xiong, 2016).

Por otro lado, el comportamiento del cobre en fases volátiles es completamente diferente, la presencia de azufre y cloro aumenta significativamente la solubilidad de este. En los procesos hidrotermales, si existe presencia de fluidos acuáticos en el magma ascendente, la circulación del cobre se da dentro de sales o de vapores (Liu & Xiong, 2016). La transferencia de masa del cobre desde el magma hasta la fase volátil, es el proceso más importante en el desarrollo de un yacimiento tipo pórfido de Cu (Audetat & Simon, 2012). Los principales minerales mena de cobre son: calcopirita CuFeS_2 , bornita Cu_5FeS_4 , cubanita CuFe_2S_3 , calcosina Cu_2S , covellita CuS , tennantita $3\text{Cu}_2\text{SAs}_2\text{S}_3$, tetraedrita $3\text{Cu}_2\text{SSb}_2\text{S}_3$, enargita Cu_3AsS_4 (Vasallo, 2008).

3.2.1.4. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DEL COBRE EN EL PERÚ

El rango de abundancias de cobre, en sedimentos de corriente en el Perú, va desde valores menores a 0.5 ppm hasta valores mayores a 10 000 ppm (1%) y además denota un umbral geoquímico regional promedio de 84 ppm. Las máximas concentraciones de este metal son espacialmente variadas, tal es así, que encontramos valores superiores a 10 000 ppm en el sector de Pelagatos (Pasto Bueno, región Ancash), como también valores de 2022 ppm en Honda (Pampas de Hospital, región Tumbes), de 1059 ppm en Catalina Huanca

(Monobamba, región Junín) y por último de 965 ppm en el sector de Antabamba (Pachaconas, región Apurímac) (INGEMMET, 2017).

3.2.1.5. GEOQUÍMICA PRIMARIA DEL PLOMO

Rankama & Sahama (1962) explican que el plomo es de carácter calcófilo en la litosfera, por lo tanto, muestra una afinidad bastante pronunciada para el azufre y también para el oxígeno.

De acuerdo al tamaño del radio iónico del plomo, se considera un elemento incompatible, en el grado de incompatibilidad de los elementos de las tierras raras, pero no tanto como el Th o el U. El mineral más abundante de plomo en la naturaleza es la galena (PbS), mientras que, en los silicatos, el Pb puede reemplazar al K, particularmente en el feldespato alcalino (Weis, 2016).

El contenido de plomo aumenta desde las rocas ultrabásicas y básicas hacia a las rocas ácidas. Se concentra en los remanentes ácidos de las fases terminales tanto de los magmas basálticos como graníticos. Este metal es transportado dentro de los fluidos hidrotermales junto con aniones complejos. Los principales minerales de plomo son: galena PbS que frecuentemente contiene otros elementos como Sb, Bi y Ag, jamesonita $Pb_4FeSb_6S_{14}$, boulangerita $Pb_5Sb_4S_{11}$, burnonita $CuPbSbS_3$; en la zona de oxidación cerusita $PbCO_3$ y anglesita $PbSO_4$ (Vasallo, 2008).

3.2.1.6. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DEL PLOMO EN EL PERÚ

El rango de concentraciones de Plomo, en sedimentos activos de corriente en el Perú, va desde valores menores a 0.02 ppm hasta valores mayores a 10 000 ppm (1%).

Por otro lado, el umbral geoquímico regional promedio de este metal es de 75 ppm y las máximas concentraciones se encuentran básicamente en el sector central y austral del país, donde las mayores anomalías corresponden a valores mayores a 1%. Es así que destacan los distritos de Toromocho (región Junín), de San Cristóbal (región Junín) y Pasto Bueno (región Ancash) (INGEMMET, 2017).

3.2.1.7. GEOQUÍMICA PRIMARIA DEL ZINC

Rankama & Sahama (1962) afirman que la concentración más alta de zinc se encuentra en la fase sulfurada de los meteoritos, por otra parte, los meteoritos silicatados contienen cantidades muy pequeñas de este metal y en la litosfera superior es evidente que el zinc es de carácter calcófilo y oxifilo.

En la mayoría de los fluidos corticales, el zinc es transportado a modo de complejo clorurado, aunque la información termodinámica muestra que también algunos complejos sulfurados (como el biosulfuro de zinc) pueden volverse vehículos importantes a altas temperaturas (Brugger, 2018).

Durante la diferenciación magmática el zinc permanece, en gran cantidad, en los fundidos y volátiles remanentes en el transcurso del estadio principal de la cristalización; se ha evidenciado que la mayor abundancia de zinc, se da en los últimos productos de la diferenciación, que son los más ácidos (Rankama & Sahama, 1962). El zinc está muy

concentrado en los depósitos hidrotermales (formados a temperaturas relativamente bajas); en realidad solo en estos, el zinc presenta un contenido económico importante (Brugger, 2018). Entre los principales minerales de zinc tenemos a la esfalerita ZnS la cual puede contener Cd, In, Ga y Ge, en la zona de oxidación smithsonita ZnCO_3 y calamina $\text{Zn}[\text{SiO}_2\text{O}_7](\text{OH})_2$ (Vasallo, 2008).

3.2.1.8. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA SECUNDARIA DEL ZINC EN EL PERÚ

Por su parte la abundancia de zinc, en el ambiente secundario, se encuentra en un intervalo de 0.4 ppm y valores mayores a 10 000 ppm. Su umbral geoquímico regional es de 222 ppm y presenta anomalías en los sectores de Yanahuichay (>1%, región Junín), Tingo (>1%, región Pasco) y Mortine (1%, región Puno) (INGEMMET, 2017).

3.2.2. DISPERSIÓN GEOQUÍMICA

Las rocas contienen naturalmente elementos químicos, en diferentes abundancias; sin embargo, existen fenómenos geológicos que provocan concentraciones de estos elementos en áreas relativamente pequeñas llamadas depósitos minerales, estas representan un beneficio económico (Arndt et al., 2017). En algunas circunstancias, la génesis de depósitos minerales, genera halos químicos y mineralógicos significativos que se propagan desde algunos metros hasta varios kilómetros (Thompson, 2017). El derivado patrón geoquímico procedente del halo puede contener elementos trazas característicos del depósito mineral y alteraciones de los minerales originales. Al aumentar la distancia del depósito mineral

principal el halo cambia de carácter (diferente composición y concentración) (Thompson, 2017).

La dispersión secundaria se da por el esparcimiento de elementos que ocurre en el ambiente superficial o cercano a este, en la mayoría de los casos mucho después de la formación del depósito mineral (Kyser et al., 2015).

De acuerdo a Thomson (2017) los principales procesos superficiales que generan la dispersión secundaria son: 1) Erosión física y transporte de minerales del depósito mineral; los minerales resistentes a condiciones ambientales superficiales son transportados a mayor distancia, mientras que los minerales que no poseen tal resistencia, se descomponen debido al transporte químico de elementos y precipitación o atrapamiento en minerales secundarios o en zonas orgánicas. 2) Movimientos fisicoquímicos de elementos y minerales en suelos formados sobre los depósitos minerales, la dispersión en suelos y perfiles de regolitos dependen del clima, el tipo de suelo y la topografía. El patrón de dispersión resultante puede observarse en superficie aun cuando el depósito mineral se encuentre cientos de metros debajo de esta. 3) La actividad biológica puede atrapar o liberar elementos, por ejemplo, por oxidación de sulfuros por bacterias con posterior transporte de elementos a través de los sistemas de raíces y la concentración en las diversas partes de las plantas.

3.2.3. MOVILIDAD GEOQUÍMICA

Cuando un elemento químico es liberado de las rocas por meteorización, su migración supérgena, es decir, su movilidad depende en gran parte de factores tales como solubilidad, pH y Eh, adsorción y reacciones competidoras (Siegel, 1992). Goldschmidt (1937) relacionó estos factores como el comportamiento de elementos químicos en

ambientes superficiales. Planteo que este comportamiento podría explicarse mediante una relación llamada "potencial iónico" y que se define por Z/r , es decir la carga iónica (Z) dividida por su radio iónico (r).

La figura 5 muestra una clasificación del comportamiento de los iones con respecto al agua en tres zonas de reactividad basado en sus valores de Z/r (Siegel, 1992). Aquellos que tienen muy alto potencial iónico, atraen iones de oxígeno y forman oxianiones solubles $[(\text{PO}_4)^{3-}, (\text{SO}_4)^{2-}, (\text{MoO}_4)^{2-}]$. Los elementos con potencial iónico intermedio son generalmente inmóviles a causa de la muy baja solubilidad y fuerte adsorción a las superficies (Al, Ti, Sn). Los elementos de transición con capas electrónicas internas incompletas (Fe, Cr, Cu, Ag y otros de la mitad de la Tabla Periódica) tienden a ser menos solubles y fuertemente adsorbidos que aquellos iones que no son elementos de transición, de carga y radio iónico similares. Las diferencias en las valencias también resultan en movilidades diferentes (por ejemplo, Fe^{2+} y Fe^{3+}) (Viladevall, 2008).

Otras guías para medir la movilidad relativa de los elementos, además del potencial iónico son las condiciones fisicoquímicas del ambiente, refiriéndonos al pH y Eh, los cuales generan ambientes del tipo ácido ($\text{pH} < 7$) o alcalino ($\text{pH} > 7$) y oxidante ($\uparrow \text{O}_2$) o reductor ($\downarrow \text{O}_2$). Estos ambientes actúan como barreras geoquímicas, es decir son zonas en las cuales algunos elementos precipitan y provocan una disminución en la intensidad de migración. Por ejemplo, en la superficie de meteorización normal, las condiciones caerían en la columna de pH 5-8 de la Tabla 3. Cerca de un cuerpo de mineralización de sulfuros en condiciones oxidantes, las condiciones serían mucho más ácidas, pero todavía oxidantes, y en pantanos, aguas estancadas y suelos y ambientes ricos en materia orgánica, las



condiciones serían reductoras. Un cuerpo de mineralización oxidante en un ambiente de carbonato se aproximaría a una condición casi neutra (Viladevall, 2008).

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{an_x}$$

37

agua, en %. Los factores “Kx” brindan una herramienta para comparar la intensidad de migración de los elementos principales y secundarios en los estudios de geoquímicos. La Tabla 3 resume la movilidad relativa de varios elementos importantes en geoquímica aplicada. (Siegel, 1992).

Tabla 3. Movilidad de los elementos de acuerdo al pH y Eh.

Movilidad relativa	Oxidante (pH 5 - 8)	Oxidante (pH < 4)	Reductor (pH > 8)
Altamente móvil (K > 10)	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, Mo, B (Se, Te, Re)	Cl, Br, I, S, Rn, He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente móvil (K = 1 - 10)	Ca, Na, Mg, Li, F, Zn, Ag , U, V, As, (Sr, Hg, Sb)	Ca, Na, Mg, Sr, Li, F, Zn , Cd, Hg, Cu , Ag, Co, Ni, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li, Sr, Ba, Ra, F, Mn
Débilmente móvil (K = 0.1 - 1)	K, Rb, Ba, Mn, Si, Ge, P, Pb , Cu , Ni, Co, (Cd, Be, Ra, In, W)	K, Rb, Ba, Si, Ge, Ra	K, Rb, Si, P, Fe
Inmóviles (K < 0.1)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, T.R., Pt, Au, (Cr, Ni, Ta, Bi, Cs)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, T.R., Pt, Au, As, Mo, Se	Fe, Al, Ga, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Sn, T.R., Pt, Au, Cu , Ag , Pb, Zn , Cd, Hg, Ni, Co, As, Sb, Bi, U, V, Se, Te, Mo, In, Cr, (Nb, Ta, Cs)

**Tomada de Siegel (1992).*

Goldschmidt (1937) clasificó a los productos de la segregación intensa que tiene lugar durante la meteorización, erosión, transporte y deposición de material sedimentario (Tabla 4). Estos productos, sean minerales resistentes a la meteorización (resistatos), minerales que forman y que son estables en ambientes oxidantes o reductores (oxidatos o reductatos), minerales que componen los esqueletos de los organismos invertebrados (biodados), arcillas (hidrolizados) o carbonatos y evaporados, constituyen fases donde se concentran ciertos elementos relacionados con cada producto.

Perel'man (1986) relacionó esta movilidad con las barreras geoquímicas ambientales que se consignan en la Tabla 5.

Tabla 4. Clasificación de los principales productos sedimentarios.

Resistatos (Si)	Oxidatos (Fe, Mn)	Hidrolizados (Al, Si, K)	Carbonatos (Ca, Mg)
Cuarzo	Goetita	Arcillas	Calcita
Circón	Limonita	Boemita	Dolomita
Magnetita	Pirolusita	Bauxita	Aragonita
Ilmenita		Arcillas negras	
Rutilo			
Monacita			
Casiterita			
Au, Pt			
	Evaporatos (Na, Ca, Mg, B)	Reduztatos (C, S, CH, S²⁻)	Biodados (Ca, Mg, Si, P)
	Halita	Carbón	Calcita
	Yeso	Petróleo	Chert
	Anhidrita	Pirita	Fosforita
	Epsomita	Azufre	
	Boratos		
	Calcita		
	Aragonita		
	Dolomita		

**Tomada de Goldschmidt (1937).*

Tabla 5. Agrupaciones de elementos concentrados en las barreras geoquímicas.

	Fuertemente ácida	Débilmente ácida	Neutral y débilmente alcalina	Fuertemente alcalina
	(pH < 3)	(pH = 3 - 6.5)	(pH = 6.5 - 8.5)	(pH > 8.5)
BARRERAS GEOQUÍMICAS	AGUAS OXIDANTES			
Oxidante	Fe	Fe, Mn, Co	Mn	-
Reductora H ₂ S	Tl, Cu, Hg, Pb, Cd, Bi, Sn, As, Sb, Mo, W, U	Tl, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Sn, Cr, Mo, U	Tl, Cr, Mo, U, Se, Re, V	Cu, Ag, Zn, Cr, Mo, U, V, As
Gley reductor	Cu, U, Mo	Cu, U, Mo	Cu, Cr, U, Mo, Re, Se, V	Cu, Ag, Cr, Mo, U, Re, Se, V, As
Alcalina	Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, ETR, Cr, P, As, U	Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, (U)	-	-
Ácida	-	-	Si, Mo	(Cu, Zn), Ag, Be, Al, Ga, Sc, Y, ETR, Si, (Ge), Zr, (Ti), Mo, Cr, V
Evaporación	Na, K, Rb, Tl, Cl, Mg, Ca, Sr, S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Al, Mo, U	-	Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br, I, Mg, Ca, Sr, S, Zn, Mo, U, V, Se	Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br, I, Cu, Zn, Mo, U, Se, V
Adsorción	Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	Si, Ba, Zn, Cd, Ni, Co, Pb, Cu, U, Cl, Br, I, F, S, P, V, Mo, As	Li, Na, K, Rb, Cs, Th, Zn, (Cl, Br, I, F, B, S, P, V, Mo, As)	Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, (Cl, Br, I, B, F, S, P, V, Mo, As)
Termodinámica	-	Mg, Sr, Ca, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Ni	(li), Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Pb	Zn, (Cu, U)
BARRERAS GEOQUÍMICAS	AGUAS REDUCTORAS DE GLEY			
Oxidante	Fe	Fe, Mn, Co	(Fe), Mn, Co	Mn
Reductora H ₂ S	Tl, Pb, Cd, Bi, Sn	Tl, Fe, Co, Ni, Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, U	Tl, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg, (Mo, U)	Tl, Cu, Zn, Cd, Hg, Mn, (Fe, Co, Ni, U)
Gley reductor	Cu, U, Mo	Cu, U, Mo	Mo, U	Mo, U

Alcalina	Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, ETR, Cr, P, As, (U)	Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, ETR, Cr, P, As, (U)	Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Cd, Mn, Co, Ni	-
Ácida	-	-	Si, Mo	(Cu, Zn), Be, Al, Ga, Sc, Y, ETR, Si, Zr, (Ti), Mo
Evaporación	Na, K, Rb, Tl, Cl, Mg, Ca, Sr, S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Al, Mo, U	-	Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, Cl, Br, I, Mg, Ca, Sr, S, Zn	Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br, I, Zn
Adsorción	Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	Si, Ba, Zn, Cd, Ni, Co, Pb, Cu, U, Cl, Br, I, F, S, P, Fe, Mn	Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, Zn, (Cl, Br, I, F, B, S, P)	Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, (Cl, Br, I, F, B, S, P)
Termodinámica	-	Mg, Ca, Sr, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Ni, Fe	(Li), Mg, Ca, Sr, BA, Zn, Pb, Mn	Zn, (Cu, U)
BARRERAS GEOQUÍMICAS				
AGUAS REDUCTORAS CON H₂S				
Oxidante	S, Se, (Fe)	S, Se	S, Se	S, Se
Reductora H ₂ S	-	-	-	-
Gley Reductor	-	-	-	-
Alcalina	Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Pb, Cd, Be, Al, Ga, Y, ETR, Cr, P, As	Mg, Ca, Sr, Ba	-	-
Ácida	-	-	Si, Ge	Be, Al, Ga, Sc, Y, ETR, Si, Ge, Zr, (Ti)
Evaporación	Li, Na, K, Rb, F, Cl, Br, I, Mg, Ca, Sr, S	-	Li, Na, K, Rb, F, Cl, Br, I, Mg, Ca, Sr, S	Li, Na, K, Rb, N, B, F, Cl, Br, I
Adsorción	Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As	Sr, Ba, (Cl, Br, I, F, B, S, P)	Li, Na, K, Rb, Cs, (Cl, Br, I, F, B, S, P)	Li, Na, K, Rb, Cs, (Cl, Br, I, F, B, S, P)
Termodinámica	-	Mg, Ca, Sr, Ba	Mg, Ca, Sr, Ba	-

*Los elementos entre paréntesis son menos comunes en las asociaciones.

**Tomado y modificado de Perel'man (1986).*

3.2.4. ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS

De acuerdo a Gorgas (2011) estas son medidas características de una distribución estadística, donde resaltan las llamadas medidas centrales, puesto que nos entregan el valor promedio de los datos o el entorno cercano en el cual se distribuyen estos.

- **Media**

Gorgas (2011) indica:

Supongamos que tenemos una muestra de tamaño N , donde la variable estadística x toma los valores x_1, x_2, \dots, x_N . Se define la media aritmética X_m , o simplemente media, de la muestra como:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Es decir, la media se calcula sencillamente sumando los distintos valores de “ x ” y dividiendo por el número de datos “ N ” (p. 21).

- **Mediana**

Gorgas (2011) define a este parámetro como:

Una medida central tal que, con los datos ordenados de menor a mayor, el 50% de los datos son inferiores a su valor y el 50% de los datos tienen valores superiores. Es decir, la mediana divide en dos partes iguales la distribución de frecuencias o, gráficamente, divide el histograma en dos partes de áreas iguales (p. 25).

- **Varianza y desviación estándar**

Gorgas (2011) explica:

La medida más usada para estimar la dispersión de los datos es la desviación estándar, esta es especialmente aconsejable cuando se usa la media aritmética como medida de tendencia central. Está basada en un valor promedio de las desviaciones respecto a la media. Se usan los cuadrados de la diferencia de la media aritmética y cada valor que toma cada muestra. Se representa como sigue:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Evidentemente la varianza no tiene las mismas unidades que los datos de la muestra. Para conseguir las mismas unidades se define la desviación estándar (algunas veces llamada desviación típica) como la raíz cuadrada de la varianza (p. 31).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

3.2.5. CORRELACIÓN DE PEARSON

Según explica Orellana (2001):

Sean (X_i, Y_i) las observaciones realizadas en cada uno de los n sujetos de una muestra de tamaño n . Definimos el *coeficiente de correlación muestral de Pearson* entre X e Y como:

$$r = Corr(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{s_X s_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(n-1) s_X s_Y}$$

Donde S_x y S_y son las desviaciones estándares muestrales de las variables X e Y respectivamente (p. 55).

Las propiedades del coeficiente de correlación de Pearson de acuerdo a Orellana (2001) son:

- r toma valores entre -1 y 1 ($-1 \leq r \leq 1$),
- r mide la fuerza de la asociación LINEAL entre X e Y ,
- $r = 0$ implica que no hay relación lineal entre las variables,
- $r = + 1$ implica que todos los puntos caen sobre una recta de pendiente positiva (asociación positiva),
- $r = - 1$ implica que todos los puntos caen sobre una recta de pendiente negativa (asociación negativa),
- mientras mayor el valor absoluto de r mayor la fuerza de la asociación,
- el valor de r no depende de las unidades de medición,
- el coeficiente de correlación trata a X e Y simétricamente, no identifica cual es la variable dependiente y cual la independiente.

El coeficiente de correlación de Pearson mide exactamente cuán cercanos se encuentran los puntos alrededor de una LÍNEA RECTA que indique la tendencia general (p. 55).

3.2.6. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Se explicará el concepto y fundamento del método más no la matemática detrás de este, debido a que no es el propósito de este trabajo de investigación.

El objetivo de este método es transformar un grupo de variables, denominadas *originales*, en un grupo nuevo de variables denominadas *componentes principales*. Las últimas tienen como característica principal la *incorrelación* entre sí y se ordenan de acuerdo a la cantidad de información que contienen. La varianza es utilizada para medir la cantidad de información de una componente, o sea, *a mayor varianza mayor cantidad de información*. Por lo tanto, como es lógico, la primera componente será la de mayor varianza y así sucesivamente hasta llegar a la última componente que es la de menor varianza. Para la extracción de las *componentes principales* se debe estandarizar o tipificar las variables, esto con el fin de evitar errores derivados de la escala. Si se han estandarizado “ p ” variables, la sumatoria de sus varianzas es “ p ”, debido a que la varianza de una variable estandarizada siempre es 1. El número de componentes *principales* que genera el método es igual al número de *variables originales*, donde la suma de las varianzas de los primeros es la misma que la de los últimos. Matemáticamente, las componentes principales son una expresión lineal de las variables originales. La diferencia entre estos dos grupos de variables consiste en que las *componentes principales* se determinan de forma que no estén correlacionadas entre sí. Es importante recalcar que mientras mayor correlación existe entre las *variables originales*, su variabilidad se puede explicar con pocas *componentes principales*. En el caso que las *variables originales* no tuvieran correlación alguna, la aplicación de este método sería absurda, en razón de que las *componentes principales* coincidirían con las *variables originales*. Este método es definido como un *método de reducción*, porque

reduce la cantidad del número de variables originales. La reducción de muchas variables a pocas componentes, simplifica la interpretación de información, por este motivo este metodo tiene ventaja sobre otras técnicas multivariantes como la regresión, los clusters, etc. (De La Fuente, 2011).

3.3. GLOSARIO

- **Anomalia Geoquímica:** son zonas geoquímicamente diferentes de lo que se considera normal o promedio. Pueden ser el resultado de un inusual proceso de concentración de un elemento químico, como la génesis de un depósito mineral y la posterior meteorización y dispersión secundaria. Estadísticamente se define como el valor por encima del valor del umbral geoquímico (McQueen, 2008).
- **Asociación geoquímica:** Es el agrupamiento geoquímico de dos o más elementos químicos, el cual indica ambientes y procesos geológicos específicos (Vargas, 2007).
- **Barreras geoquímicas:** son zonas donde algunos elementos precipitan y provocan una disminución en la intensidad de migración (Perel'man, 1986).
- **Dispersión geoquímica secundaria:** se da por el esparcimiento de elementos que ocurre en el ambiente superficial o cercano a este, en la mayoría de los casos mucho después de la formación del depósito mineral (Kyser et al., 2015).
- **Dominio litoestratigráfico:** Conjunto de unidades litoestratigráficas (Grupos, Formaciones o Miembros) que pertenecen a una misma edad geológica y poseen la misma composición petrológica.
- **Elemento indicador:** es aquel elemento de fácil detección, este puede ser usado como guía para poder localizar la presencia de un elemento de mayor mportancia económica, este último con mayor dificultad de detección (Vargas, 2007).

- **Población estadística:** Conjunto de elementos o unidades de análisis de interés en el estudio (Orellana, 2001).
- **Sedimento:** Consiste en partículas de mineral u orgánicas que han sido separadas de la roca madre por diferentes procesos superficiales y erosivos (Megahan, 1999).
- **Umbral geoquímico:** “Se define como los límites de fluctuación local y regional del valor normal, viene a ser un límite superior de la fluctuación del background normal” (Rivera, 2007).
- **Unidad litoestratigráfica:** “Cuerpo rocoso que se define y reconoce en base a sus propiedades litológicas y relaciones estratigráficas” (Murphy & Salvador, 1999).

CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA REGIONAL

4.1. ESTRATIGRAFÍA

Esta zona es geológicamente variada debido a los tipos de roca existentes y a la cronología de las mismas, que datan desde el Paleozoico hasta el Cuaternario (Figura 11). Las rocas más antiguas son de tipo metamórfico y sedimentarias y se extienden al sur de la microcuenca Chahuarma; en la parte central y norte afloran secuencias volcánicas de edad Neógena; algunas de estas secuencias son intruidas por rocas ígneas del Paleógeno-Neógeno.

En esta sección se detalla a continuación la litología, la geocronología, el espesor y la relación estratigráfica de las unidades litoestratigráficas pertenecientes al área de estudio.

4.1.1. PALEOZOICO INFERIOR

Grupo Excélsior (D-e)

En el área de estudio, el Grupo Excélsior aflora longitudinalmente, en dirección regional SE - NO, con afloramientos restringidos y aislados; conforme se tiene en la quebrada Chupa, al SO de la microcuenca Chahuarma. Está constituido por lutitas y

filitas negras a gris blanquecinas bien estratificadas, incluye algunos niveles de cuarcitas y areniscas cuarcíferas bien estratificadas. Por alteración y meteorización de las lutitas esquistosas adquieren un color blanquecino brillante algo plateado, generalmente en bancos medianos a delgados.

Se desconoce la base del mismo, por lo que se infiere que es la unidad de mayor antigüedad del área de estudio. Sobre esta unidad descansan las capas rojas del Grupo Mitú, sin embargo, esto no ocurre en toda el área, a veces es sobreyacido por el Grupo Pucara (Valdivia & Raymundo, 2003).

En esta unidad no se reportaron fósiles, sin embargo, por relaciones de contacto se puede decir que el Grupo Excelsior es de edad Devónica; ya que se ha observado que infrayace a secuencias conglomerádicas del Mississipiano y del Carbonífero (Morche et al., 1996).

4.1.2. CARBONÍFERO - PÉRMICO

Grupo Mitu (PsT-mi)

En la microcuenca Chahuarma, el Grupo Mitu tiene sus afloramientos aislados y con dirección regional andina (NO-SE), localizados principalmente hacia el sector suroeste, en las faldas de la cabecera de cuenca (Figura 10).

Regionalmente, está constituido principalmente por secuencias gruesas de capas rojas (conglomerados, areniscas y lutitas) y manifestaciones de un vulcanismo alcalino hasta peralcalino, interpretado como resultado de una probable zona de “rifting” continental. Mientras que localmente, se reconocieron limolitas de granulometría fina, compuesta por granos de cuarzo y micas con laminación paralela y además andesitas con fracturas rellenas de carbonatos y óxidos (muestra 27n-R-

054a, ver Anexo I). Las secuencias volcánicas del Grupo Mitú sobreyacen a sus pares sedimentarias. Se caracterizan generalmente su composición piroclástica (brechas volcánicas, tobas soldadas, conteniendo lapillis, de pómez). Aflora en poca extensión y le sobreyace en discordancia angular el Grupo Pucara, o en algunos casos secuencias volcánicas del Neógeno (Morche *et al.*, 1996).

En el área de estudio la litología de este grupo varía lateralmente de Oeste a Este. Hacia el Oeste está conformado por capas rojas (areniscas, limoarcillitas y conglomerados de coloración rojiza) y hacia el Este, capas rojas sumadas a secuencias volcánicas y volcanosedimentarias, que se encuentran en el tope (Valdivia & Raymundo, 2003).

En esta secuencia no se han reportado fósiles, sin embargo, por relaciones de contacto se ha determinado la edad del Grupo Mitú como Pérmico superior. Es importante recalcar que, en la zona de estudio, la base de esta unidad no ha sido identificada debido al contacto con superficies de falla; pero si en sectores más al norte, donde se lo reconoció sobreyaciendo a rocas calcáreas del Carbonífero – Pérmico. Por otro lado, su techo infrayace en discordancia angular a las calizas del Grupo Pucará de edad Triásico – Jurásico. En la microcuenca Chahuarma, los afloramientos del Grupo Mitu, son cubiertos mayormente por rocas volcánicas del Neógeno (Figura 6) (Morche *et. al.*, 1996).

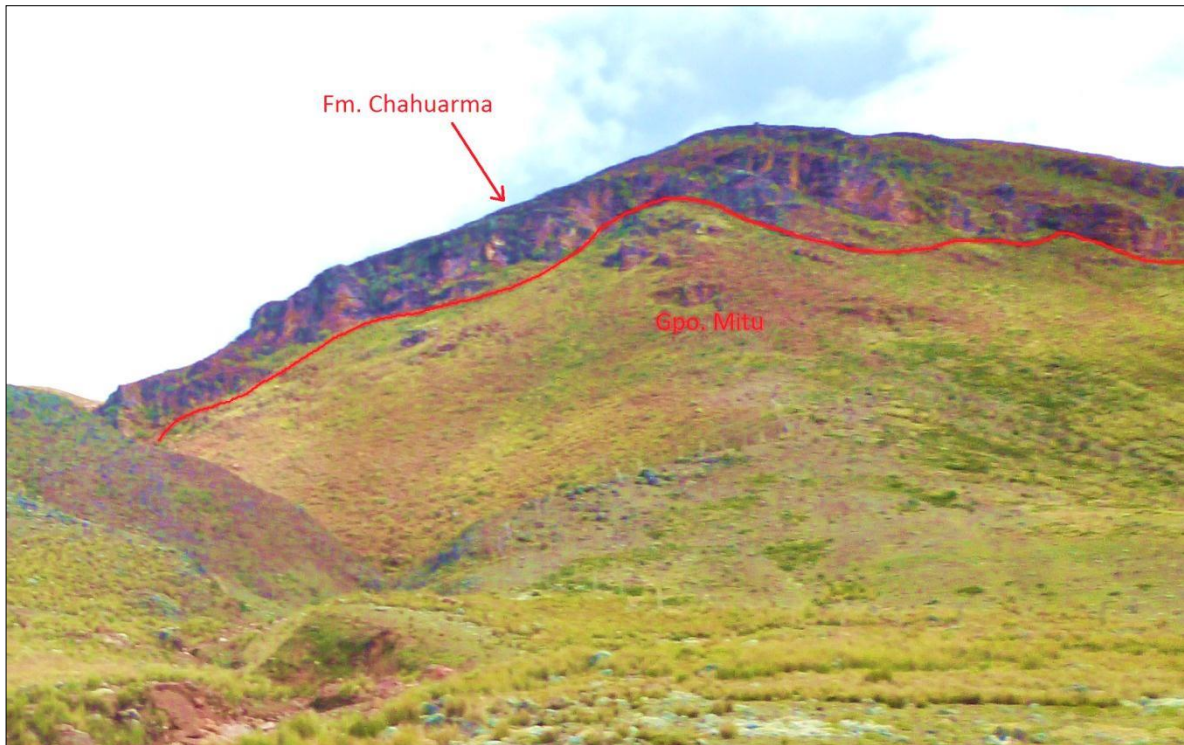


Figura 6. Capas rojas del Grupo Mitu subyaciendo a la Formación Chahuarma, localidad de Ccollpapata, vista hacia NE.

4.1.3. TRIÁSICO – JURÁSICO

Grupo Pucará (TrJi-pu)

Aflora en la cabecera de cuenca, al SE del área de estudio. Esta secuencia se divide en tres formaciones: Formaciones Chambara, Aramachay y Condorsinga, sin embargo, en el área de estudio no se ha podido reconocer cada una de ellas; por tal motivo se la describió de manera global.

Litológicamente esta unidad se describe como calizas grises oscuras con nódulos de chert hacia la base, en medio limolitas grises oscuras con intercalación de calizas tabulares y al tope calizas delgadas de coloración gris clara (Morche et al., 1996).

Morche et al. (1996) explica que: “las formas fosilíferas más frecuentes en esta unidad son moluscos y ostrácodos. Por otro lado, se ha colectado fósiles que permiten darle una edad para este de Triásico - Jurásico”.

4.1.4. PALEÓGENO – NEÓGENO

Formación Apacheta (Nm-ap)

Litológicamente está constituida por flujos piroclásticos, ignimbritas con intercalaciones de lahares de gran espesor. La erosión deja ver algunas estructuras volcánicas circulares como cuellos volcánicos y domos de los antiguos centros subvolcánicos. Las secuencias volcánicas de la Formación Apacheta sobreyacen en discordancia a las calizas del Grupo Pucará y a las capas rojas del Grupo Mitú (Figura 7). Infrayace en discordancia a las secuencias lávicas y piroclásticas de las Formaciones Chahuarma y Portuguesa (Morche et al., 1996).

De acuerdo a Mégard, Noble, Mckee y Bellon (1984), la edad de las secuencias volcánicas de la Formación Apacheta, se estima que es del Mioceno superior, debido a las dataciones radiométricas determinadas por Noble *et al.* (1972) y Mckee *et al.* (1975), las cuales estarían oscilando entre 10 y 8 M.a.

Formación Chahuarma (Nm-ch)

Morche et al. (1996) describe a esta secuencia de la siguiente manera: “Regionalmente, está constituida por una secuencia de tobas lapillíticas (ignimbritas) de color rosado amarillento a blanquecino, alternando con pequeños flujos piroclásticos, flujo de lavas andesítico – basálticas” (Figura 8) (p. 57). Por otra parte, a escala local, está compuesta por rocas de comportamiento volcánico, como

areniscas volcanoclásticas, andesitas y riolitas (muestras: 27m-R-051a, 27n-R-062 y 27n-R-025, ver Anexo I). En el área de estudio esta secuencia aflora ampliamente, con contactos discordantes sobre el Grupo Mitú, Grupo Pucará y la Formación Apacheta (Valdivia & Raymundo, 2003). Nótese que, al igual que la Formación Apacheta, esta unidad también ha experimentado reactivaciones repetitivas de la cámara magmática, manifestadas en exposiciones de diques más jóvenes, que se emplazan dentro de las secuencias preexistentes (Morche et al., 1996).

En cuanto a la edad de esta secuencia, Megard et al. (1984) la estima como Mioceno superior, basado en la datación radiométrica realizada por Noble et al. (1992) la cual entrega valores que están entre 7 +/- 0.3 M.a. (Mégard *et al.*, 1984).



Figura 7. Afloramiento de la formación Apacheta suprayaciendo a las capas rojas del Grupo Mitú.

Formación Portuguesa (Np-po)

Con esta denominación se describe a las secuencias de rocas volcánicas que forman el nevado Portuguesa. Estas rocas, afloran en toda la extensión E y SE de la microcuenca Chahuarma y está caracterizada por una litología constituida por derrames de lavas volcánicas, brechas andesíticas-dacíticas y domos riodacíticos con considerables depositaciones de tobas riodacíticas (Figura 9) (Morche et al., 1996). Morche et al. (1996) indica que: La edad de esta secuencia se considera del Plioceno medio–superior, en base a dataciones radiométricas realizadas por Noble (1974), las cuales oscilan entre 2 y 4 M.a. A partir de esto se intuye que la actividad volcánica ha sido intermitente y durante la cual se han generado diversas fases explosivas.



Figura 8. Afloramiento de la Formación Chahuarma, cerca de la ribera del río Condorpaccha.

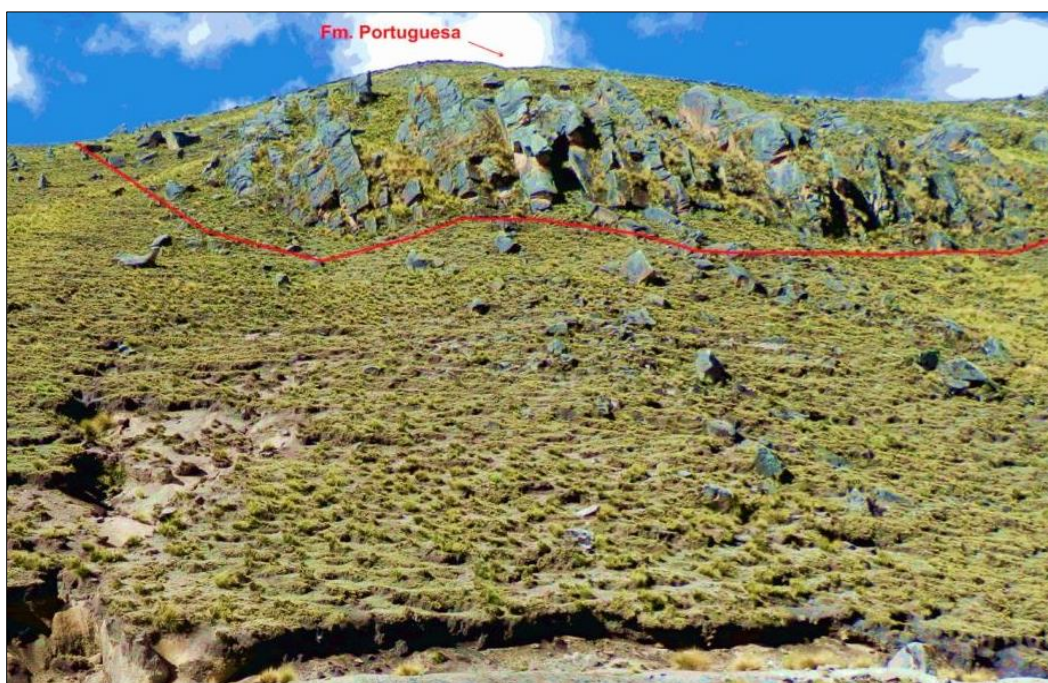


Figura 9. Afloramiento de tobas riolíticas de la Formación Portuguesa, vista hacia el noreste.

4.1.5. DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Dentro de los depósitos cuaternarios se ha distinguido los depósitos glaciofluviales y aluviales. Estos se describen a continuación:

Depósitos glaciofluviales

Morche et al. (1996) describe a estos depósitos como: materiales acarreados por los glaciales en movimientos con componente fluvial, los cuales han sido acumulados a manera de morrenas laterales o frontales. Se encuentran en los cauces de las quebradas y flancos de los valles. Muestra una composición litológica de constitución polimíctica y mal seleccionados con clastos y guijarros angulosos, subredondeados en una matriz arcillosa.

Depósitos aluviales

Morche et al. (1996), explica que: están conformados por los materiales arrastrados por los ríos y acumulados a lo largo de su trayecto dando lugar a lechos, terrazas y llanuras de inundación. En el área de estudio se encuentra cubriendo gran parte de los afloramientos rocosos con espesores variables, concentrándose mayormente en los flancos y valles glaciares lo que algunas veces alcanzan varios metros de grosor. Por erosión forman pequeñas terrazas, se caracterizan por la uniformidad litológica siendo generalmente limos y arcillas.

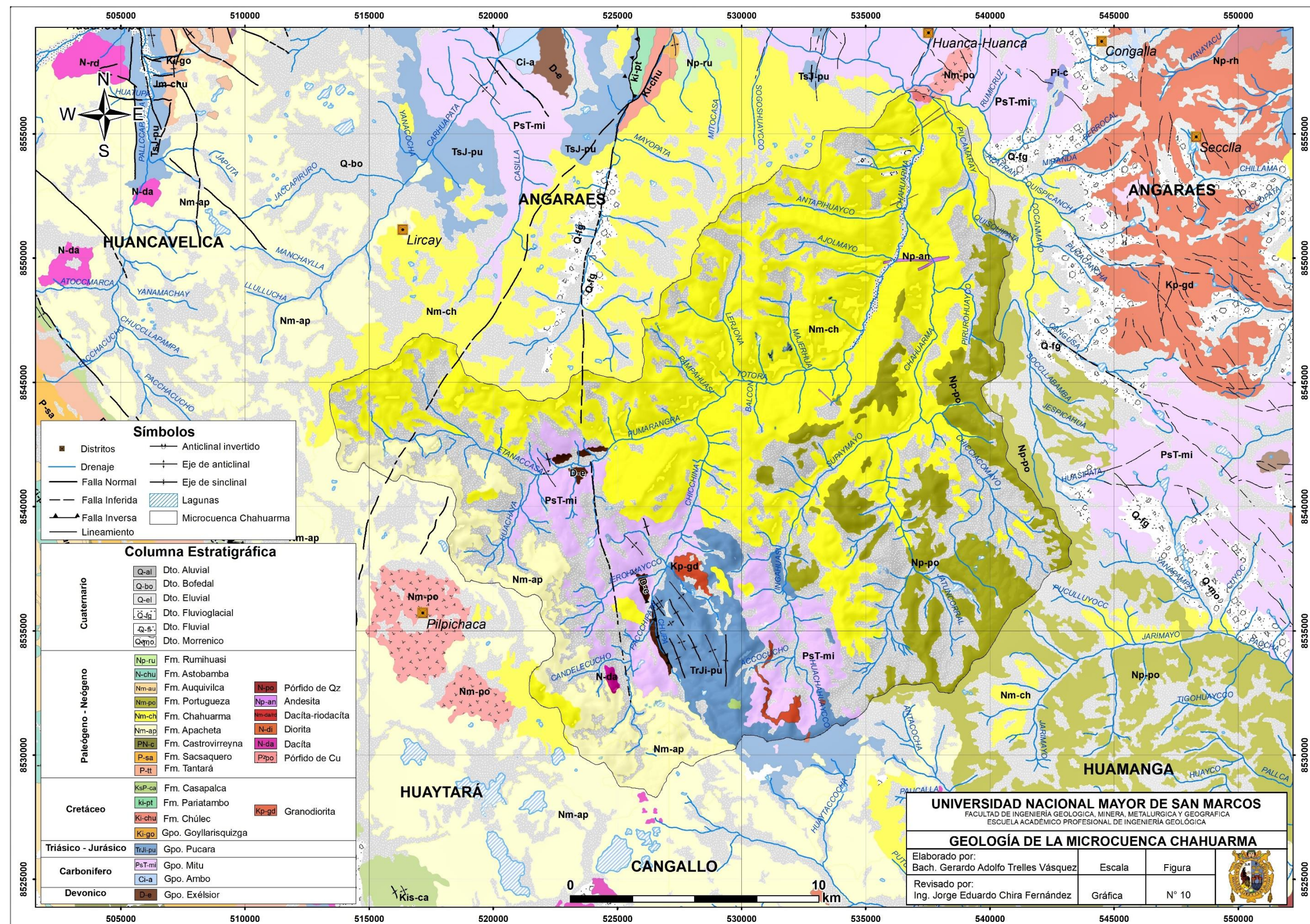


Figura 10. Mapa geológico de la microcuenca Chahuarma.

*Tomado y modificado de Valdivia & Raymond (2003).

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Grosor	Columna	Descripción Litológica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Dep. Aluviales			Clastos redondeados de tamaños variables, matriz areno-limosa.
		Pleistoceno	Dep. Glaciofluviales			Limoarcillitas y gravas debilmente compactadas.
	Neógeno	Plioceno	Tobas Atunsulla	<400		Tobas rosadas blanquesinas de naturaleza riolítica, de textura porfírica.
			Domos y lavas			Dique andesítico de textura fanerítica con cristales de plagioclasa y biotita.
			Brechas y piroclastos			Lavas andesíticas hasta riodacíticas, tobas soldadas gris verdosas, domos de naturaleza riodacítica gris blanquesino.
		Mioceno	Fm. Rumihuasi	80		Brechas de naturaleza andesítica.
			Fm. Chahuarma	300		Tobas blancas de composición riolítica, sedimentos lacustrinos.
			Fm. Apacheta	<500		Chahuarma superior, lavas andesíticas hasta basálticas.
			Fm. Rumichaca	<200		Chahuarma inferior, tobas blancas riolíticas, en capas gruesas.
	Paleógeno	Eoceno	Fm. Socos	<400		Apacheta superior, lavas de composición andesítica, brechas domos.
			Fm. Pariatambo	>100		Apacheta inferior, brechas.
		Paleoceno	Fm. Chulec	150		Tobas, areniscas cuarcíferas en capas medias, intercalados con limoarcillitas y arcillitas claras.
			Fm. Chayllacatana	100		Capas rojas, areniscas de grano grueso a microconglomerádico de coloración rojiza, capas de limoarcillitas y lodolitas gruesas.
			Grupo Goyllarisquizga	100		Calizas monótonas gris azulinas con algunas intercalaciones de limoarcillitas en capas delgadas.
			Fm. Huacaña	200		Cuerpo félsico porfírico con cristales de cuarzo, feldespato y mineralización de pirita.
Mesozoico	Cretáceo	Superior	Fm. Condorsinga	600		Limoarcillitas calcáreas, hacia arriba margas y calizas en capas gruesas a medias.
			Fm. Aramachay	200		Piroclastos, lavas andesíticas, amigdaloides de coloración negro verdoso a verde olivo.
			Fm. Chambara	750		Granodioritas de textura fanerítica con cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita.
			Grupo Mitu	>1500		Areniscas cuarcíferas blancas con estratificación sesgada.
			Grupos Tarma, Copacabana, indiferenciados	>600		Limoarcillitas gris pardas, lutitas negras carbonosas, areniscas cuarzosas de grano fino de coloración amarillenta.
	Jurásico	Superior	Fm. Chumayo	150		Calizas espáticas grises, calizas areniscosas intercalados con niveles delgados de arcillitas.
		Medio	Fm. Condorsinga	600		Calizas hacia la base en capas delgadas de color gris claro, hacia el tope en capas gruesas.
		Inferior	Fm. Aramachay	200		Limolitas gris oscuras laminadas con algunas columnas calizas grises, bien tabulares en capas delgadas.
	Triásico	Superior	Fm. Chambara	750		Hacia la base calizas gris oscuras en capas gruesas con nodulos de chert, hacia el tope en capas ondulantes.
		Inferior	Grupo Mitu	>1500		Capas rojas, areniscas, lodolitas y conglomerados, sobreyacidos por lavas andesíticas, tobas soldadas con textura eutaxítica, presenta esta unidad una coloración rojiza.
Paleozoico	Pérmiano	Superior	Grupo Mitu	>1500		Limoarcillitas gris violáceas, areniscas grisáceas, calizas en capas medias a delgadas, intercalaciones de limoarcillitas con restos carbonosos.
		Inferior	Grupos Tarma, Copacabana, indiferenciados	>600		Secuencia con formación molásica y areniscas grises de capas delgadas medianas.
	Carbonífero	Superior	Grupo Ambo	>800		Lutitas esquistosas, areniscas cuarcíferas característicamente monótonas, su coloración es de gris verdoso a beige, en capas medianas a delgadas, fuertemente plegadas y fracturadas.
		Inferior	Grupo Ambo	>800		
Paleozoico	Devoniano		Grupo Excelsior	>1000		
			Grupo Excelsior	>1000		

Figura 11.. Columna estratigráfica de los alrededores de la microcuenca Chahuarma.

*Tomada y modificada de Morche et al. (1996).

4.2. ROCAS ÍGNEAS

En el área de estudio existen cuerpos intrusivos de dimensiones pequeñas, que no sobrepasan los 4 km, estos presentan naturaleza plutónica o subvolcánica (Valdivia & Raymundo, 2003). Los plutones son pocos o nulos y tienen un rango de edad de cretácica - neógena, mientras que los cuerpos subvolcánicos pertenecen al Mioceno - Plioceno, donde se generaron las secuencias volcánicas subsecuentes (Morche et al., 1996).

4.2.1. ROCAS INTRUSIVAS

El emplazamiento de estas rocas fue explicado por Morche et al. (1996), donde describe este evento de la siguiente manera: este proceso provocó metamorfismo en las rocas sedimentarias y volcánicas que actuaron como roca caja. Se puede notar halos de metamorfismo incipiente en algunos plutones, principalmente en contacto con las secuencias calcáreas del Grupo Pucará, dando lugar a la formación de skarns; de alteraciones hidrotermales como propilitización, piritización y silicificación. Este fenómeno se observa claramente en los volcánicos de la Formación Apacheta en el sector NO de la hoja de Huachocolpa.

Regularmente a estos cuerpos intrusivos se les asocia mineralización de tipo polimetálica (Morche et al., 1996).

Intrusivo Accocucho (Kp-gd)

Se encuentra aflorando al suroeste de la microcuenca Chahuarma, en la localidad de Accocucho (Figura 10). Se describen a este cuerpo como granodioritas de textura fanerítica, de grano grueso que se emplaza dentro de las secuencias sedimentarias del Grupo Mitu. Sus minerales mayoritarios son plagioclasas, cuarzo, biotita, apatito y ortosa. Por sus relaciones de contacto se le considera de edad Cretácico superior – Paleógeno inferior (Valdivia & Raymundo 2003).

Intrusivo Jerococha (Kp-gd)

Valdivia & Raymundo (2003) explican acerca de este cuerpo lo siguiente: Está localizado hacia el NO del intrusivo Accocucho y su composición es granodiorita, corta a las areniscas y conglomerados del Grupo Mitu y a las secuencias calcáreas del Grupo Pucará. Su textura es fanerítica de grano grueso a medio con cristales de plagioclasas subherdrales, ortosa y biotita. Al Igual que el intusivo Accocucho, por relaciones de contacto, se le ha estimado una edad de Cretácico superior –Paleógeno inferior (p.15).

4.2.2. ROCAS SUBVOLCÁNICAS

Pórfido Jechcca(Nm-po)

Según Valdivia & Raymundo (2003): “son cuerpos félsicos porfíricos con cristales subhedrales de feldespato, cuarzo y matriz alterada con mineralización de pirita. Estos cuerpos tienen formas semi-circulares con apariencia de domos” (p.17). Se ubican en las cercanías de los límites suroccidental y nororiental de la microcuenca Chahuarma, en las localidades de Jechcca y Huaychanpalja respectivamente (ver Figura 6).

Diques (Np-an)

De acuerdo a Valdivia & Raymundo (2003) “existen varios diques de forma tabular de 5 a 10 m de grosor y con longitudes de 1 hasta 5 km que afloran a lo largo del río Chahuarma, específicamente en el sector central de la microcuenca del mismo nombre” (p.17). En este sector se presentan cortando a las secuencias volcánicas de la Formación Chahuarma. La composición de estos diques es andesítica de textura fanerítica con cristales de plagioclasas, biotita, y pasta gris afanítica microcristalina.

Pórfido Cachia (N-da)

Este cuerpo volcánico, se encuentra ubicado en el sector SO de la microcuenca Chahuarma, aflora en corta extensión e intruye a la secuencia volcánica Apacheta. Está constituido por dacitas porfiríticas color blanquecinas con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y biotita. Se ha identificado débil alteración del tipo argilización (Valdivia & Raymundo, 2003).

4.3. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

En el área de estudio, la actual configuración de las estructuras geológicas ha sido desarrollada como producto de la tectónica Hercínica y Andina (Figura 12).

La tectónica Hercínica se desarrolló durante el Devónico superior hasta el Triásico inferior; en ella se dio lugar a varias fases de deformación, lo cual generó compresiones, reactivación de fallas antiguas y dinámica de bloques, los cuales ascendieron y descendieron, provocando como consecuencia erosión y sedimentación. Igualmente, fuertes plegamientos deformaron a las rocas de las unidades más antiguas, dejándolas, en general, en discordancia angular; estas características se manifiestan en las rocas de los Grupos Excelsior y Mitu. Posterior a esto, se produjo una trasgresión marina y depositación puramente marina, dando como resultado la formación de las secuencias carbonatadas del Grupo Pucará cuya edad oscila entre el Triásico superior al Jurásico medio (Valdivia & Raymundo, 2003).

Al iniciar el Cretáceo superior, se produce un cambio litológico brusco que se da a consecuencia de la tectónica Andina, en la cual se desarrollaron distintas fases hasta el Plioceno. Este evento provocó la deformación de las rocas mesozoicas, plegándolas y fallándolas en dirección andina (NO-SE); el resultado, una sedimentación mayormente de ambiente continental. Mientras tanto, el magmatismo aumenta

considerablemente durante el Cenozoico, dando lugar a rocas volcánicas y volcano-sedimentarias, las mismas que han sido afectadas por plegamientos y fallamientos (Valdivia & Raymundo, 2003).

4.3.1. PRINCIPALES ESTRUCTURAS

Según Valdivia & Raymundo (2003) las principales estructuras se dividen en:

Lineamientos con dirección anti-andina (NE-SO)

Estos lineamientos tienen una orientación anti-andina y se manifiestan a lo largo de las secuencias cenozoicas. Se cree que estos lineamientos han reactivado durante las Fases Quechua II y III, afectando a las Formaciones Apacheta y Chahuarma principalmente, las mismas que en su deposición, dieron lugar a las grandes erupciones explosivas.

Sistema de Fallas Huachocolpa

Se describe así a un conjunto de fallas que se encuentran alrededor de la localidad de Huachocolpa. Estas fallas son de rumbo andino (NO-SE y N-S), y de comportamiento inverso y transformantes, produciendo desplazamientos y sobreescurrecimientos de las unidades del Triásico y Jurásico.

Sistema de lineamientos Condoray

Estos lineamientos se observan hacia el sector oriental del cuadrángulo de Huachocolpa, en la extensión del cerro Condoray. Poseen direcciones andinas (NO-SE y NS) y algunas de ellas son interpretadas como fallas de rumbo.

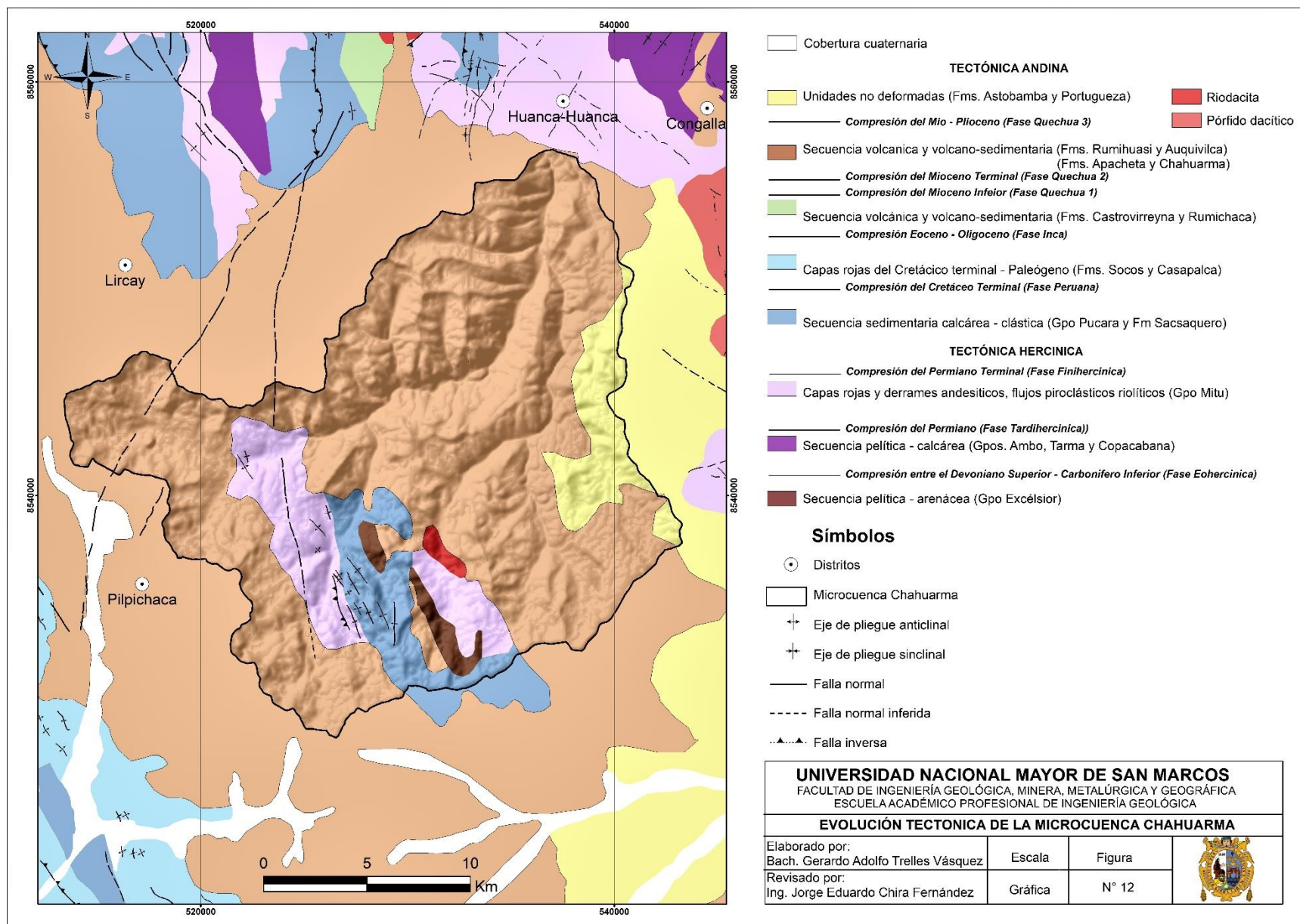


Figura 12. Mapa tectónico de la microcuenca Chahuarma.

* Tomada y modificada de Morche et al., (1996).

4.4. GEOLOGÍA ECONÓMICA

La microcuenca Chahuarma abarca dos franjas metalogenéticas: la franja XVII (Franja de epitermales de Au – Ag del Eoceno y depósitos polimetálicos del Eoceno – Oligoceno – Mioceno) y la franja XXI (Franja de epitermales de Au – Ag del Mioceno hospedados en rocas volcánicas cenozoicas); específicamente la subfranja XXI-b (Franja de depósitos polimetálicos con superposición epitermal) (Carlotto *et al.*, 2009).

En el área de estudio, ambas franjas metalogenéticas están constituidas por los mismos metalotectos, los cuales están conformados por unidades volcánicas del Neógeno (Fm. Portuguesa, Fm. Apacheta, Fm. Chahuarma, Fm. Cahuana y Fm. Auquivilca) y por unidades sedimentarias carbonatadas del Triásico (Gpo. Pucará).

En adición a esto, cabe resaltar que alrededor del área de estudio se observan varios yacimientos en distintas etapas de desarrollo minero. Específicamente se puede identificar en la figura 14, la cual muestra que la microcuenca Chahuarma se encuentra rodeada de importantes operaciones mineras de Plata y Zinc, teniendo como subproductos al Cobre y al Plomo, estas son Huachocolpa (15 km al noroeste), Julcani (18 km al norte) y Reliquias (40 km al oeste). Así también se observa, que a 60 km al noroeste se encuentra el proyecto en cartera Pukaqaqa, el cual reporta ingentes recursos de Plata, Plomo y Zinc. Por último, en la cercanía del área prospectada se reconocen varios yacimientos que se encuentran en etapas de desarrollo minero en fases inferiores (áreas prospectivas y proyectos con exploración avanzada) que también sirven como indicadores del contexto geológico – económico en el que se sitúa la microcuenca Chahuarma.

A partir de la publicación de Chira, Ríos, Trelles y Villarreal (2018) “*Estimación del potencial minero metálico del Perú y su contribución al Estado acumulado al 2050*” se pudo determinar el porcentaje de aporte económico de cada metal base en los alrededores de la zona de estudio (Figura 13), con base en los recursos y reservas reportadas por las

empresas propietarias de dichos yacimientos mineros y de las estimaciones realizadas por INGEMMET de las áreas prospectivas. Es de esta manera, que la tabla 6 muestra la riqueza minera del entorno de la microcuenca Chahuarma, evidenciando por ende su potencial geológico-económico.

Tabla 6. Recursos metálicos finos alrededor de la microcuenca Chahuarma.

Etapa de desarrollo	Unidades	Ag (Moz)	Pb (Tmf)	Zn (Tmf)	Cu (Tmf)
OPERACIONES	Huachocolpa	11.22	201,278	237,538	23,063
	Julcani	6.62	6,576	-	1,042
	Reliquias	4.07	272	-	-
PROYECTOS	Pukaqaqa	4.95	-	-	920,000
EXPLORACIÓN AVANZADA	Siglo nuevo	-	-	-	-
	El Milagro	0.50	-	10,300	-
ÁREAS PROSPECTIVAS	Lauricocha	-	-	-	125,000
	Antacancha	-	-	-	125,000
	Escopeta	-	-	50,000	-
	Chirichachay	-	-	150,000	-
	Castrovirreyna	-	-	250,000	-
	El Alcatraz	-	-	100,000	-
Total		27.36	208,127	797,838	1,194,105

*Tomada y modificada de Chira et al. (2018).

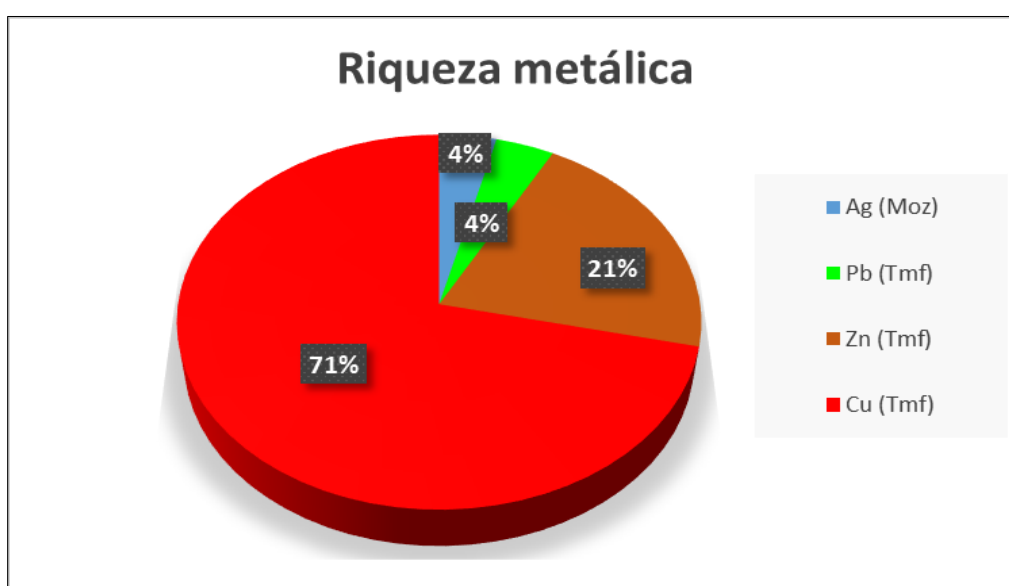


Figura 13. Porcentaje de aporte económico de los recursos metálicos finos de los yacimientos ubicados en la cercanía de la zona de estudio.

*Tomado y modificado de Chira et al. (2018).

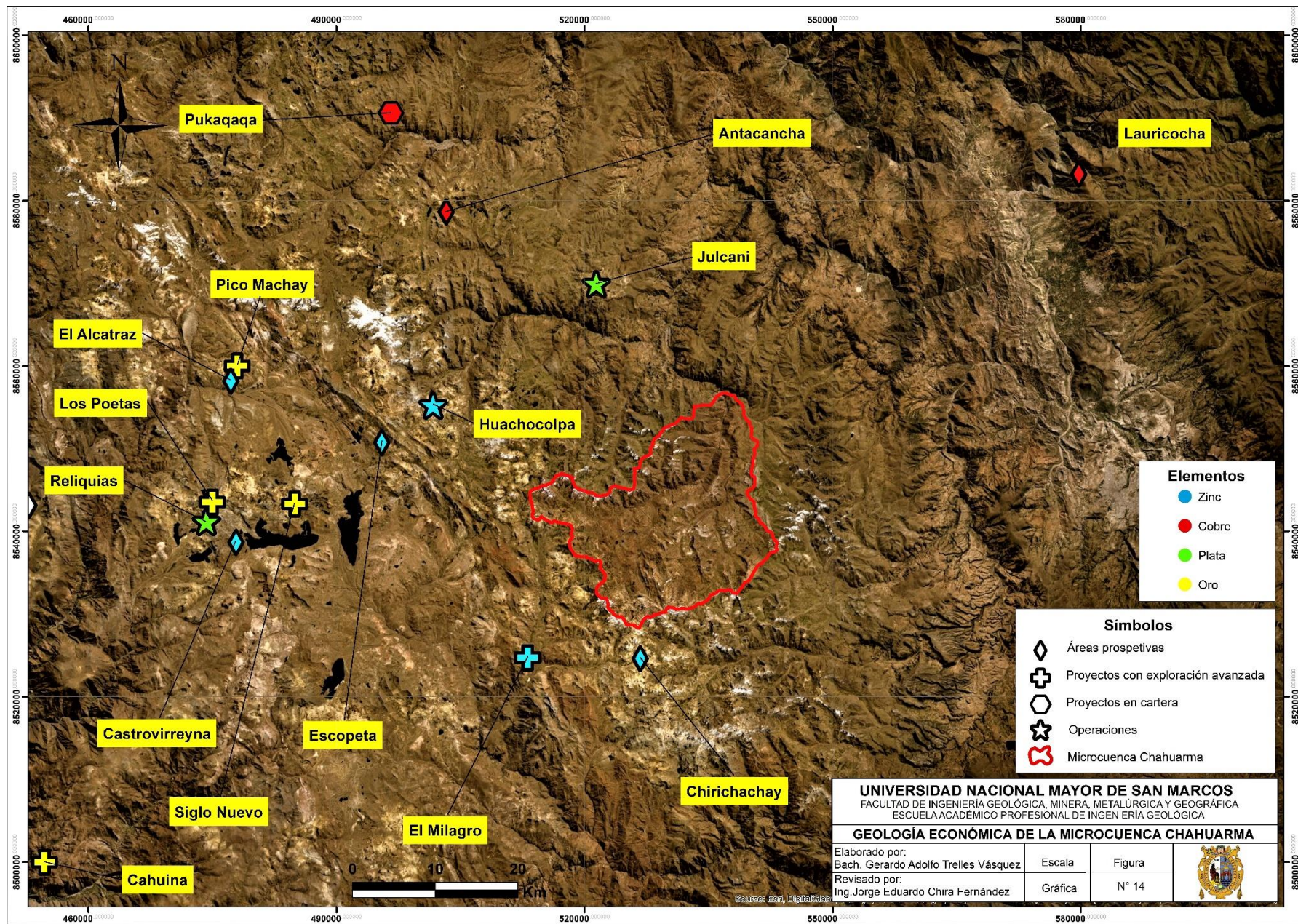


Figura 14. Mapa de la geología económica alrededor del área de estudio.

CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Esta investigación se realizó en tres fases sistematizadas y estructuradas. La primera fase llamada fase de pre-campo, se basó en la recopilación de información (mapas geológicos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, boletines geológicos, revistas, artículos científicos, etc.) y en el diseño de muestreo. La segunda fase denominada fase de campo consistió en la recolección de muestras de sedimentos activos de corriente. Y por último la tercera fase, la fase de post-campo, la cual consistió en el envío de las muestras al laboratorio para el análisis químico correspondiente, el procesamiento de los datos y la interpretación de los resultados. De esta manera siguiendo estos pasos se consiguió el objetivo de la investigación y se llegó a distintas conclusiones y recomendaciones.

5.1. UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis de este estudio la constituyen los datos de análisis químicos de elementos trazas de las muestras de sedimentos de corriente, recolectadas en la microcuenca Chahuarma – región Huancavelica, específicamente las muestras cuyos aportes sedimentarios pertenecen principalmente a rocas volcánicas del Neógeno.

5.2. POBLACIÓN

La investigación se centró en el SO de la cuenca del río Mantaro, específicamente en la microcuenca Chahuarma – Huancavelica, debido a que el INGEMMET, posee estudios realizados en dicha zona y cuenta con la suficiente información de sedimentos activos de corriente, 60 muestras en total. Recalcando que en el año 2003 se recolectaron dieciséis (16) muestras y en el 2016, cuarenta y cuatro (44).

5.3. MUESTRA

Líneas arriba se indicó que en el área de estudio se contaban con 60 muestras en total, sin embargo, la unidad de análisis son los sedimentos activos de corriente que fueron aportados por el dominio litoestratigráfico “Volcánicos del Neógeno”, del cual se extrajo 46 muestras de sedimentos, dicho dominio está representado por las formaciones Portuguesa, Chahuarma y Apacheta (Tabla 7).

Tabla 7. Numero de muestras utilizadas en el estudio.

Dominio litoestratigráfico	Unidad litoestratigráfica	N° de muestras
Volcánicos del Neógeno	Fm. Portuguesa	21
	Fm. Chahuarma	17
	Fm. Apacheta	8

5.4. PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA

Consiste en la etapa previa a la exploración en la cual se procede a examinar zonas de interés económico, las que se determinan mediante un estudio de teledetección (observando la geomorfología de la zona, la coloración de las rocas aflorantes y la tectónica presente en el área de estudio) y un estudio de orientación (consistente en la definición de áreas de ocurrencia mineralógica asociada a depósitos metálicos que ya han sido descubiertos anteriormente).

Este método se puede realizar recolectando muestras de rocas, sedimentos, suelos, plantas o aguas; y se puede aplicar a diferentes escalas, regional (1/100,000–1/50,000), semi-detallado ($<1/50,000 - 1/5,000$) y detallado ($<1/5,000$).

Al aplicarse este método al presente trabajo de investigación se refiere a la prospección geoquímica regional de sedimentos activos de corriente.

En primera instancia este trabajo consistió en la elaboración de un diseño de muestreo geoquímico a escala regional donde se determinaron las áreas a muestrear, obteniendo una densidad de muestreo mínimo de 1 muestra cada 3 Km lineales y como máximo 1 muestra cada 6 km lineales. Esto condujo a la recolección de 44 muestras de sedimentos de quebrada (figura 15).

En las estaciones de muestreo, se realizó la toma de información: espacial (coordenadas), fisicoquímica (pH – Eh) y geológica (litología de la roca fuente). Con la información de terreno y con los resultados de los análisis de laboratorio se procedió a generar el procesamiento estadístico para determinar el comportamiento geoquímico de los metales en la microcuenca Chahuarma (figura 16).

5.5. MUESTREO DE SEDIMENTOS ACTIVOS DE CORRIENTE

Para la recolección de sedimentos de corriente, se cumplió cabalmente con el protocolo interno de muestreo en campo de INGEMMET (2005). Aprovechando zonas idóneas, es decir, zonas de menor energía donde se deposite el sedimento (figura 17).

El muestreo se desarrolló tamizando 4 o 5 kg de sedimento en un tamiz N° 30 (0.595 mm) (figura 18). Debido a la existencia de material suspendido (coloides), se procedió a agregar floculante con el fin de decantarlo y separarlo de la solución. Las muestras de carácter húmedo se colocaron en bolsas microporosas, mientras que las muestras secas en bolsas de polietileno, para finalmente codificarlas y sellarlas.

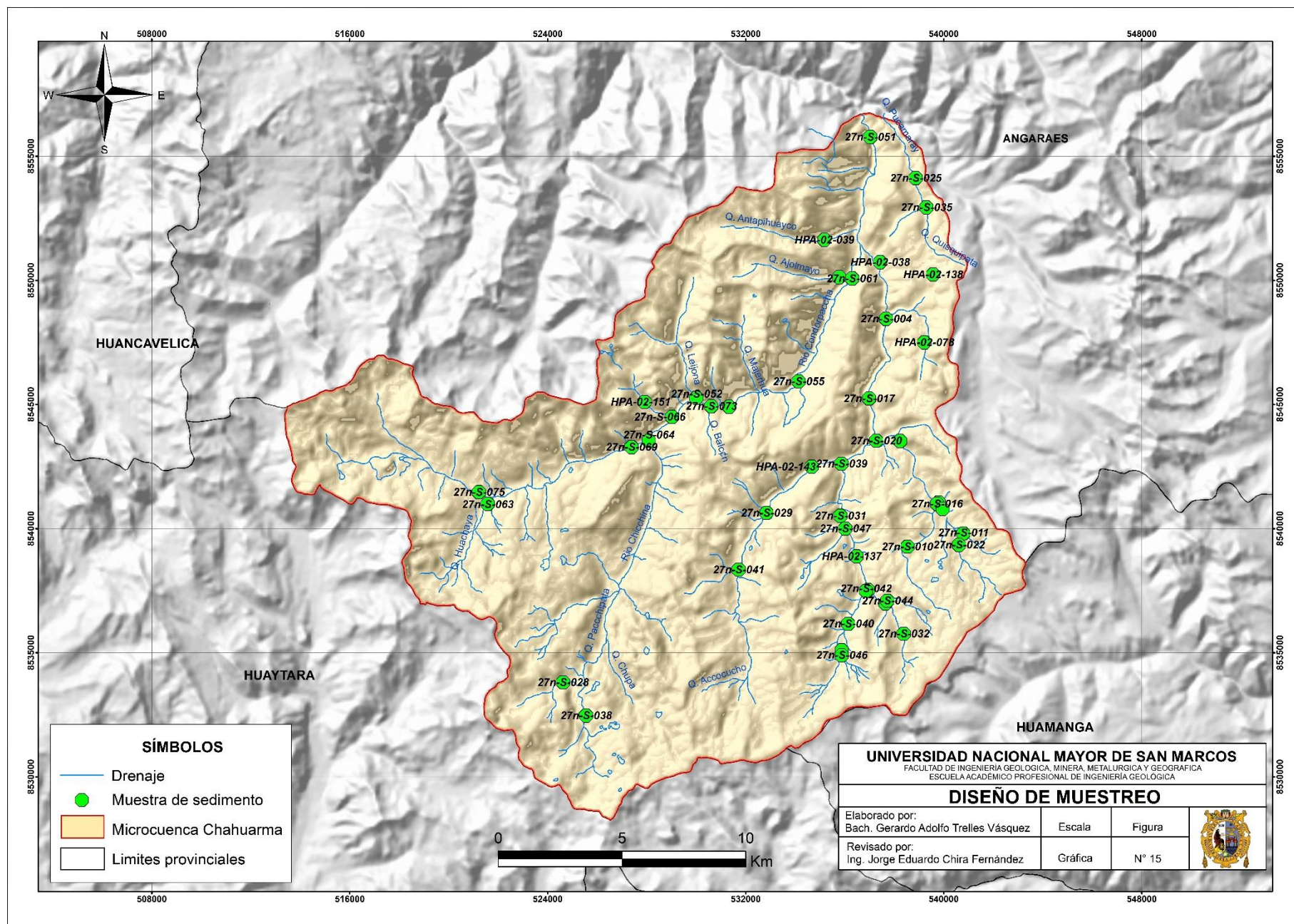


Figura 15. Mapa de diseño de muestreo en el área de estudio.



Figura 16. Toma de información (coordenadas, datos geológicos, etc.) en estación de muestreo.



Figura 17. Zonas de menor energía, propicias para la acumulación de sedimentos y adecuadas para la recolección de muestras.



Figura 18. Tamizado del sedimento en un tamiz n°30, donde pasa el sedimento fino.

5.6. PROCESAMIENTO ANALÍTICO

Lo más adecuado para analizar las muestras de sedimentos ha sido aplicarle un ataque con agua regia, para posteriormente determinar los elementos mayores y trazas por el método ICP- Espectrometría de Masa, mientras que para la determinación de oro se utilizó la técnica de Ensayo al fuego y Espectrometría de Absorción Atómica.

5.6.1. ATAQUE QUÍMICO

Digestión con agua regia:

Vargas (2007) explica:

Se basa en una combinación de 3:1 de HCl (ácido hidroclicóricu): HNO₃ (ácido nítricu) para el tratamiento de sedimentos. Se recomienda para todas las muestras que no contengan material orgánico y presenten un contenido bajo de sulfuro.

El ácido nítrico destruye la energía orgánica y las sustancias con óxidos de sulfuro que en reacción con concentrados de ácido hidroclicóricu genera el Agua Regia.

El agua regia puede proveer un mejoramiento de la anomalía en algunos ambientes geológicos, siendo un solvente efectivo para muchos sulfatos, sulfuros, óxidos y carbonatos, suministrando una digestión parcial para muchos elementos formadores de roca de una naturaleza refractaria (p.54).

5.6.2. METODOS ANALÍTICOS

Espectrometría de Masa – Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS):

De acuerdo a Vargas (2007):

El ICP-MS proporciona información multielemental en una gran variedad de muestras. El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización a presión atmosférica que junto a un espectrómetro de masas (MS) a vacío, constituye el equipo de ICP-MS. Se basa en la ionización de los componentes de la muestra y en la posterior separación de los iones obtenidos en función de su relación masa-carga. La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Ar. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados. Con este método se pueden determinar un total de 52 elementos, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 8, con sus correspondientes límites de detección. El equipo que realiza este análisis se muestra en la Figura 19 (p.56).

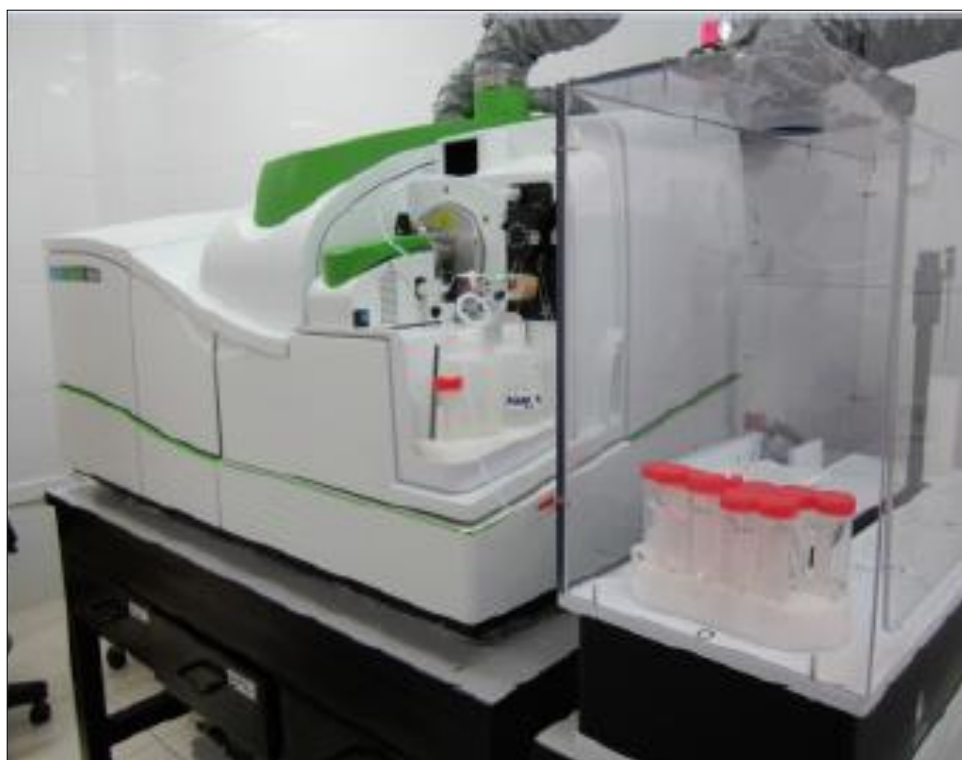


Figura 19. Equipo de espectroscopia de masas de plasma acoplado ICP-MS.

Tabla 8. Límites de detección ICP-MS para muestras de sedimento.

Elemento	Unidad	Método	L.D.I.	L.D.S.	Elemento	Unidad	Método	L.D.I.	L.D.S.
-	-	-	-	-	Cs	ppm	ICM12B	0.05	1000
Al	%	ICM12B	0.01	15	Ga	ppm	ICM12B	0.1	10000
B	ppm	ICM12B	10	10000	Ge	ppm	ICM12B	0.1	10000
Ba	ppm	ICM12B	5	10000	Hf	ppm	ICM12B	0.05	500
Ca	%	ICM12B	0.01	15	Hg	ppm	ICM12B	0.01	10000
Cr	ppm	ICM12B	1	10000	In	ppm	ICM12B	0.02	500
Cu	ppm	ICM12B	0.5	10000	La	ppm	ICM12B	0.1	10000
Fe	%	ICM12B	0.01	15	Lu	ppm	ICM12B	0.01	1000
K	%	ICM12B	0.01	15	Mo	ppm	ICM12B	0.05	10000
Li	ppm	ICM12B	1	50000	Nb	ppm	ICM12B	0.05	1000
Mg	%	ICM12B	0.01	15	Ni	ppm	ICM12B	0.5	10000
Mn	ppm	ICM12B	5	10000	Pb	ppm	ICM12B	0.2	10000
Na	%	ICM12B	0.01	15	Rb	ppm	ICM12B	0.2	10000
P	ppm	ICM12B	50	10000	Sb	ppm	ICM12B	0.05	10000
S	%	ICM12B	0.01	5	Sc	ppm	ICM12B	0.1	10000
Sr	ppm	ICM12B	0.5	10000	Se	ppm	ICM12B	1	1000
Ti	%	ICM12B	0.01	15	Sn	ppm	ICM12B	0.3	1000
V	ppm	ICM12B	1	10000	Ta	ppm	ICM12B	0.05	10000
Zn	ppm	ICM12B	1	10000	Tb	ppm	ICM12B	0.02	10000
Zr	ppm	ICM12B	0.5	10000	Te	ppm	ICM12B	0.05	1000
Ag	ppm	ICM12B	0.01	10	Th	ppm	ICM12B	0.1	10000
As	ppm	ICM12B	1	10000	Tl	ppm	ICM12B	0.02	10000
Be	ppm	ICM12B	0.1	100	U	ppm	ICM12B	0.05	10000
Bi	ppm	ICM12B	0.02	10000	W	ppm	ICM12B	0.1	10000
Cd	ppm	ICM12B	0.01	10000	Y	ppm	ICM12B	0.05	10000
Ce	ppm	ICM12B	0.05	1000	Yb	ppm	ICM12B	0.1	100
Co	ppm	ICM12B	0.1	10000	-	-	-	-	-

**Tomada y modificada de laboratorios SGS (2015).*

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra el procedimiento de cómo se calculó la estadística descriptiva, la correlación bivariada y el análisis multivariado de los metales base presentes en el dominio litoestratigráfico “Volcánicos del Neógeno”.

En específico se determinaron los estadísticos descriptivos tales como la media, la mediana, la desviación estándar, la varianza, el valor máximo, el valor mínimo, etc., para describir de manera concreta el grupo de datos de cada población estadística. En el análisis de datos es imprescindible el uso de los test de normalidad, en este trabajo se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov corregido de Lilliefors.

Finalmente, para establecer afinidades o asociaciones geoquímicas entre dos o más variables, se procedió a realizar análisis bivariado (correlación de Pearson) y análisis multivariado (análisis de componentes principales).

Como se mencionó en el capítulo V, en el subcapítulo “*Muestra*”, en el año 2003 se recolectaron dieciséis (16) muestras de sedimentos, de las cuales se estudiaron nueve (9); mientras que en el 2016 se recolectaron cuarenta y cuatro (44) muestras, de las cuales treinta y siete (37) se utilizaron en este trabajo. Si bien es cierto, que las muestras del proyecto más reciente fueron analizadas por 53 elementos (incluyendo Au) y las muestras restantes correspondientes al proyecto más antiguo fueron analizadas por 32 elementos, es necesario aclarar que, para homogenizar la información, se decidió solo realizar el procesamiento

estadístico de solo los elementos químicos analizados en común para ambos proyectos (32 variables), entre ellos: elementos mayores, menores y trazas.

Es de suma importancia recalcar que previo al procesamiento de estos datos, se realizó el tratamiento estadístico correspondiente. Este consistió en reemplazar los valores menores al límite de detección inferior (LDI) por el valor obtenido de la división del LDI entre 2; mientras que en el caso de los tenores mayores al límite de detección superior (LDS) se reemplazó por el $LDS + 1$, es decir su consecutivo inmediato (ver Anexo II).

6.1. ESTADÍSTICA DE LOS METALES BASE EN EL DOMINIO LITOESTRATIGRÁFICO VOLCÁNICOS DEL NEÓGENO

Al procesar los datos aritméticos de abundancia de metales base del dominio litoestratigráfico “Volcánicos del Neógeno”, los resultados mostraron que a excepción del Zn; el resto de metales base no indican un comportamiento normal. Esto queda demostrado en la prueba de Kolmogorov-Smirnov corregida de Lilliefors (tabla 10), la cual arroja para el Cobre, la Plata y el Plomo; valores por debajo de 0.05 rechazándose así la hipótesis nula de normalidad (Dickinson y Chakraborti, 2003).

Este comportamiento no normal se podría deber a dos motivos principales: 1) que la población de los volcánicos del Neógeno muestra un patrón de distribución bimodal, el cual se puede observar en los histogramas de frecuencias y diagramas box-plot del Cu, la Ag, el Zn y el Pb (figuras 20, 21, 22 y 23) sesgando todo carácter normal; 2) en las rocas, una cantidad considerable de metales presentan distribución lognormal, lo cual podría ser el caso de esta investigación.

Es por ello, que al intentar manifestar el carácter normal de los elementos objeto de estudio, se ha visto necesario resolver este inconveniente estadístico mediante dos procedimientos adicionales:

- El primero constó en subdividir a la población estadística inicial (Volcánicos del Neógeno), en dos subpoblaciones; donde el criterio de división fue la edad de la roca fuente de aporte sedimentario de las muestras analizadas. De esta manera se obtuvo dos subpoblaciones, la primera “Volcánicos del Plioceno” y la segunda “Volcánicos del Mioceno” (tabla 9).

Tabla 9. Poblaciones estadísticas de la microcuenca Chahuarma.

Población	Subpoblaciones	Unidad litoestratigráfica	Cantidad de muestras
Volcánicos del Neógeno	Volcánicos del Plioceno	Fm. Portuguesa	21
	Volcánicos del Mioceno	Fm. Chahuarma y Fm. Apacheta	25

- El segundo procedimiento consistió en transformar los datos aritméticos en datos logarítmicos, ya que se sabe que en la mayoría de los casos las abundancias de los metales en la corteza terrestre presentan un mejor contraste estadístico a escala logarítmica.

- **Procesamiento estadístico de los datos aritméticos - Volcánicos del Neógeno**

Tabla 10. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcánicos del Neógeno.

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Statistic	df	Sig.
Cu	.166	46	.003
Zn	.065	46	.200*
Ag	.256	46	.000
Pb	.207	46	.000

*. *Este es un límite inferior a la verdadera significancia.*

a. *Corrección de significancia de Lilliefors.*

Cobre

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS		
Meda		17.393
Intervalo de confianza al 95% para la media	Limite inferior	15.314
	Limite superior	19.473
Media recortada al 5%		16.986
Mediana		16.350
Varianza		49.049
Desv. Estandar		7.0035
Minimo		8.3
Máximo		33.7
Rango		25.4
Rango intercuartilico		12.1
Asimetría		.671
Curtosis		-.485

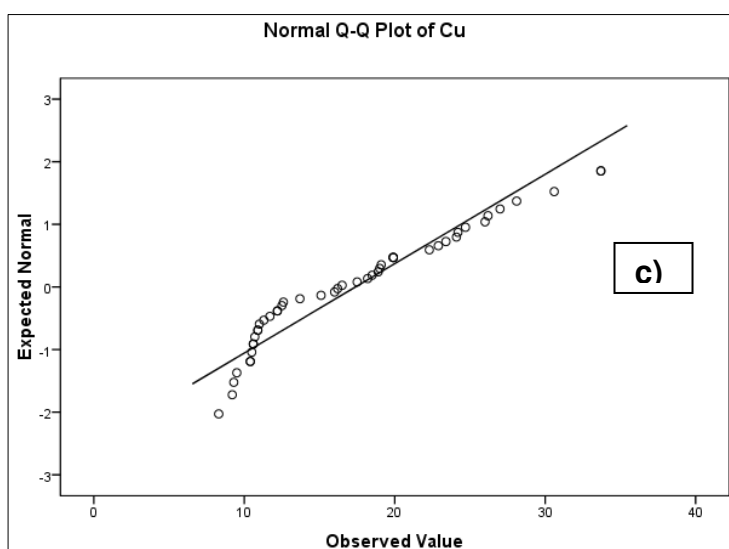
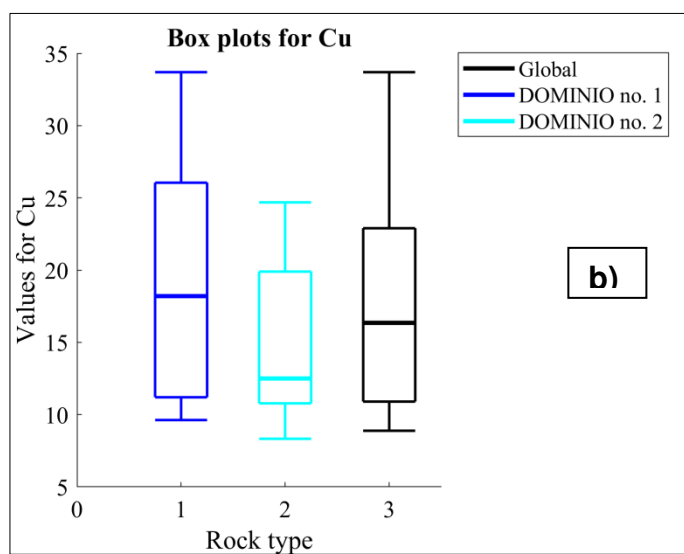
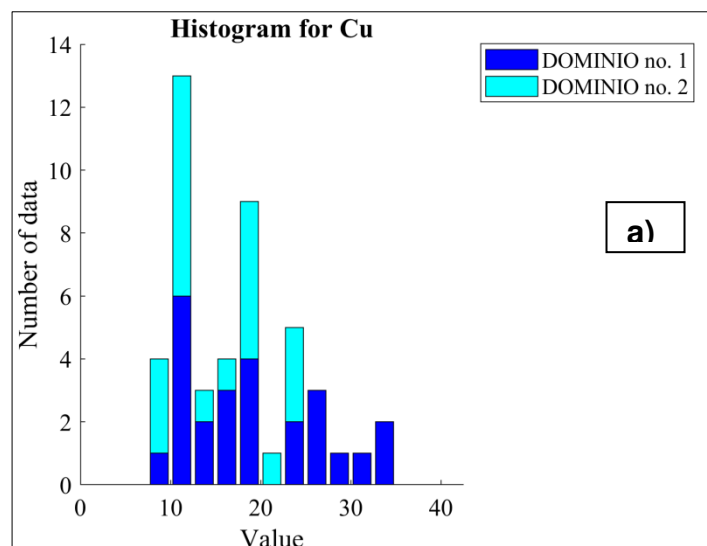


Figura 20. a) Histograma de frecuencias del Cu, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Cu para las dos subpoblaciones (VM¹=1 y VP²=2) y la población total (VN³) y c) Gráfico de normalidad del Cu.

- 1: Volcánicos del Mioceno
 2: Volcánicos del Plioceno
 3: Volcánicos del Neógeno

Zinc

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS		
Meda		65.548
Intervalo de confianza al 95%	Limite inferior	60.428
	Limite superior	70.667
Media recortada al 5%		65.126
Mediana		65.850
Varianza		297.209
Desv. Estandar		17.2397
Minimo		32.0
Máximo		113.0
Rango		81.0
Rango intercuartilico		25.7
Asimetría		.343
Curtosis		.152

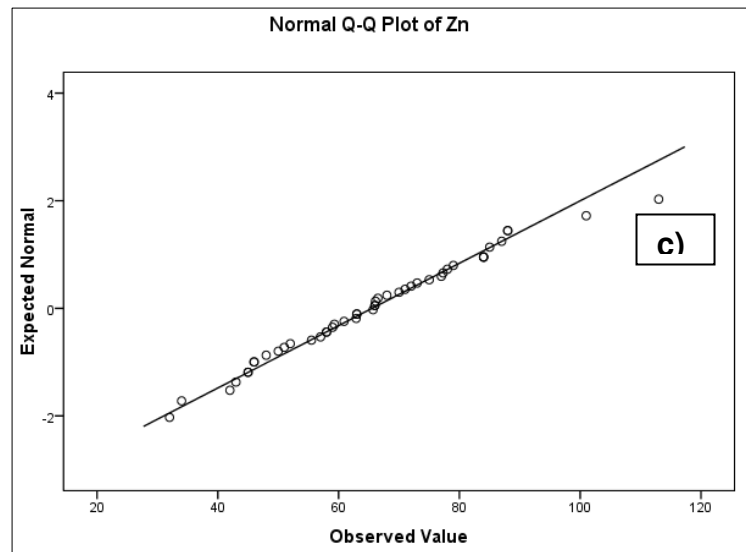
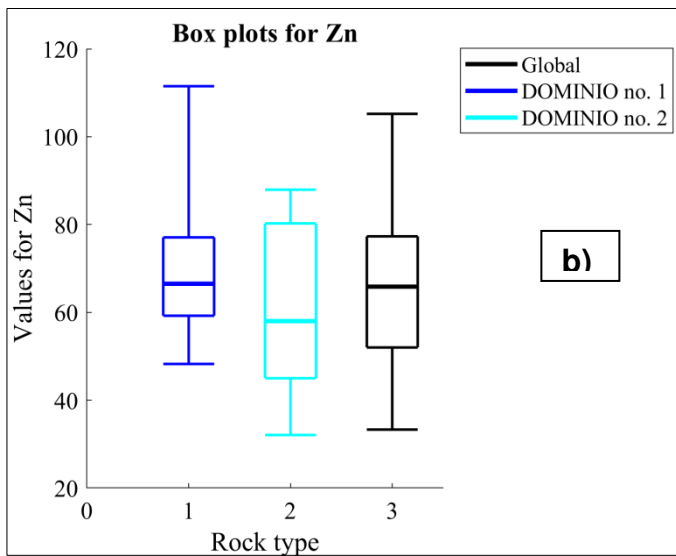
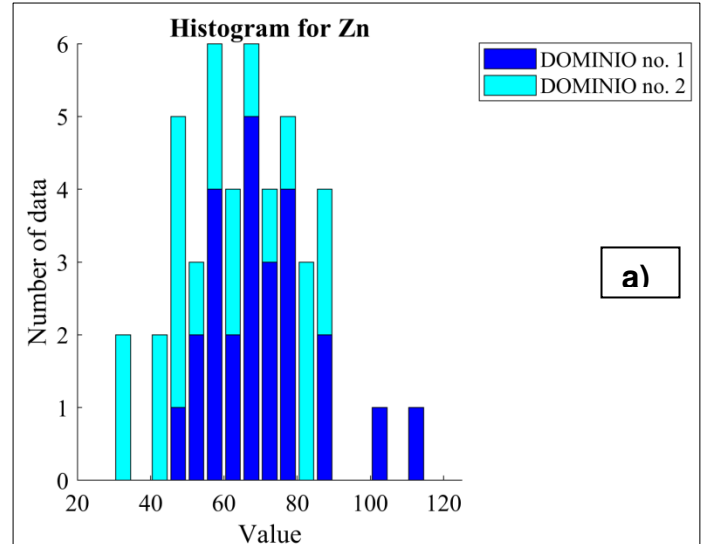


Figura 21. a) Histograma de frecuencias del Zn, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Zn para las dos subpoblaciones (VM¹=1 y VP²=2) y la poblacion total (VN³) y c) Gráfico de normalidad del Zn.

1: Volcánicos del Mioceno
 2: Volcánicos del Plioceno
 3: Volcánicos del Neógeno

Plata

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS		
Meda		.140
Intervalo de confianza al 95%	Limite inferior	.095
	Limite superior	.185
Media recortada al 5%		.120
Mediana		.085
Varianza		.023
Desv. Estandar		.1525
Minimo		.0
Máximo		.9
Rango		.9
Rango intercuartilico		.1
Asimetría		3.176
Curtosis		13.223

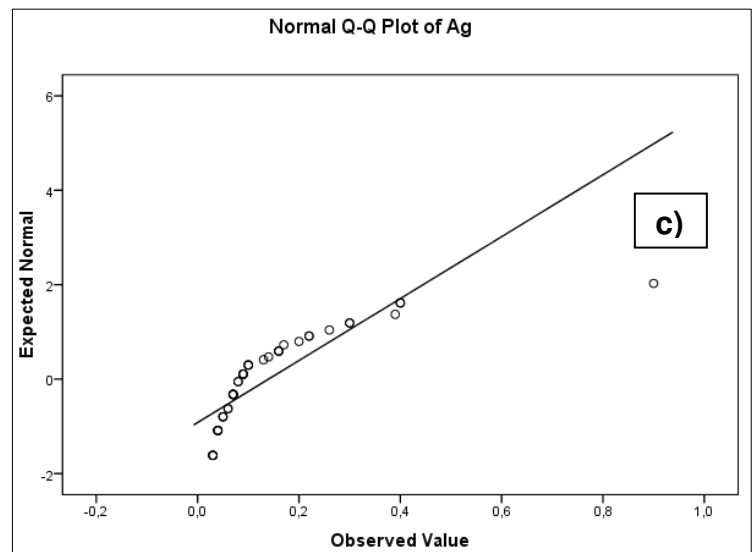
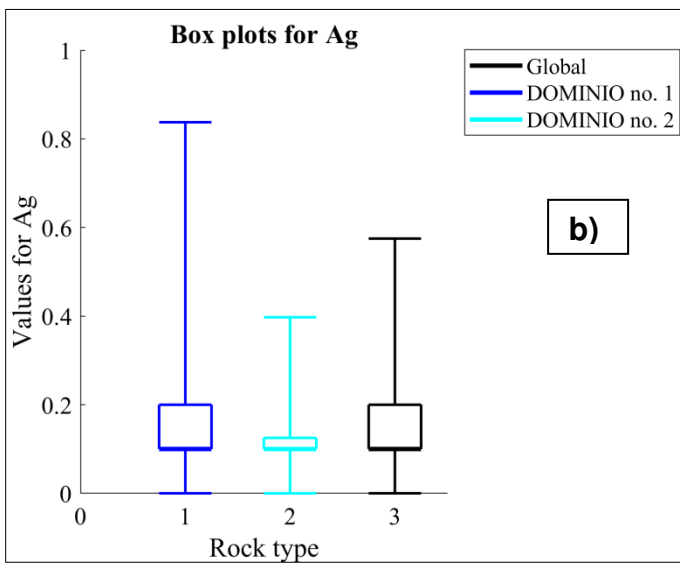
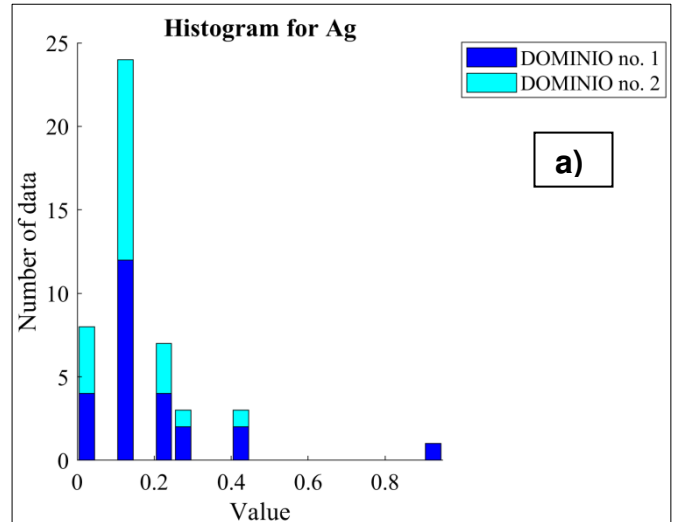


Figura 22. a) Histograma de frecuencias de la Ag, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas de la Ag para las dos subpoblaciones (VM¹=1 y VP²=2) y la poblacion total (VN³) y c) Gráfico de normalidad de la Ag.

1: Volcánicos del Mioceno
 2: Volcánicos del Plioceno
 3: Volcánicos del Neógeno

Plomo

ESTADISTICOS DESCRIPTIVOS		
Meda		13.541
Intervalo de confianza al 95%	Limite inferior	11.023
	Limite superior	16.060
Media recortada al 5%		12.515
Mediana		11.900
Varianza		71.911
Desv. Estandar		8.4801
Minimo		4.0
Máximo		53.4
Rango		49.4
Rango intercuartilico		7.0
Asimetría		2.704
Curtosis		10.412

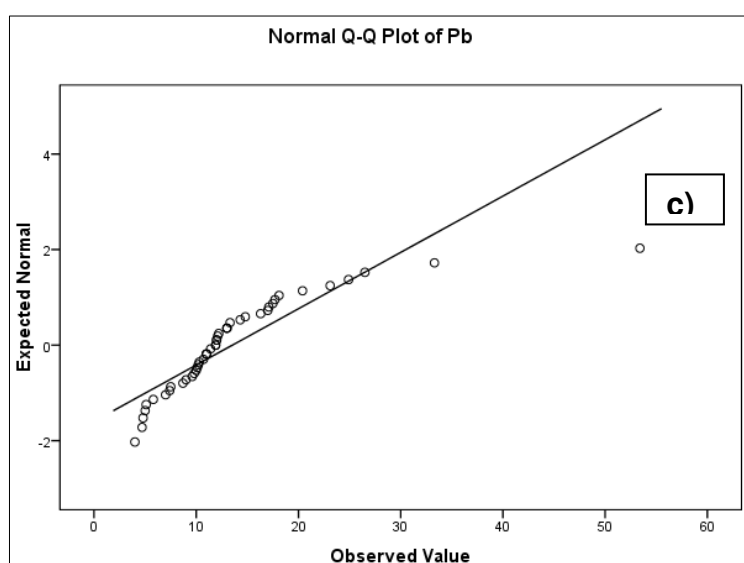
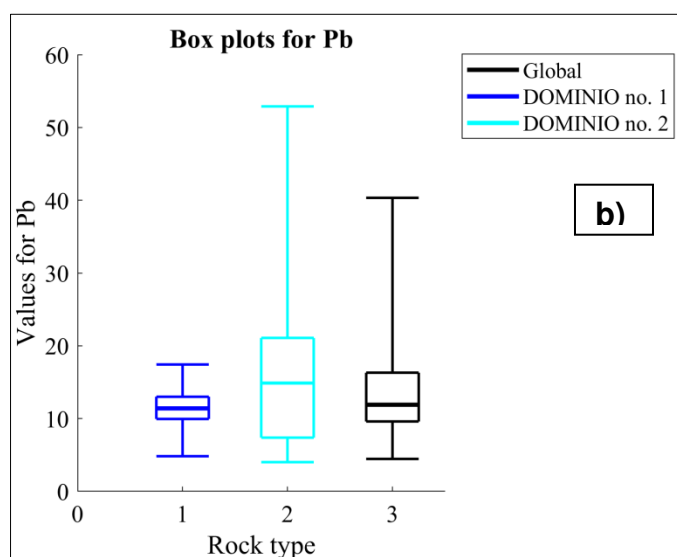
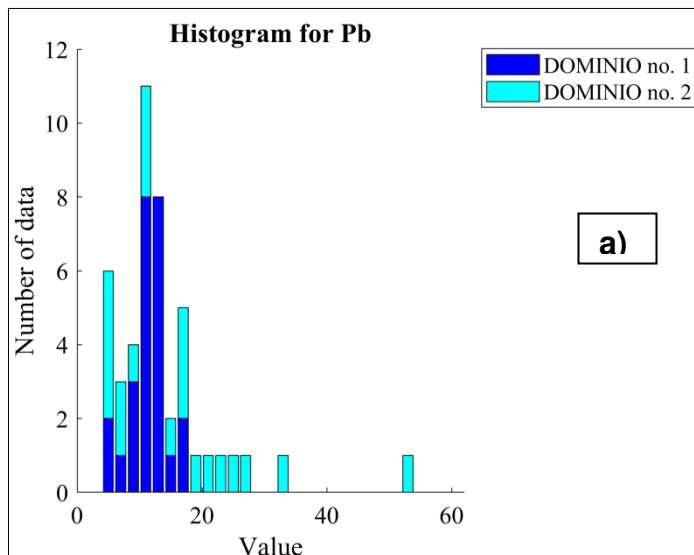


Figura 23. a) Histograma de frecuencias del Pb, donde el dominio 1 corresponde a VM y el dominio 2 a VP, b) Diagrama de cajas del Pb para las dos subpoblaciones (VM¹=1 y VP²=2) y la población total (VN³) y c) Gráfico de normalidad del Pb.

1: Volcánicos del Mioceno
 2: Volcánicos del Plioceno
 3: Volcánicos del Neógeno

- **Procesamiento estadístico de los datos logarítmicos - Volcánicos del Plioceno**

El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de la subpoblación “Volcánicos del Plioceno” muestra que los metales base presentes en este dominio litoestratigráfico tienen una distribución lognormal (figuras 24, 25, 26 y 27). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov corregida de Lilliefors (tabla 11), la cual manifiesta valores de significancia mayores a 0.05 lo que acepta la hipótesis nula de normalidad (Dickinson y Chakraborti, 2003).

Sin embargo, esto no ocurre en el caso de la Plata, donde se observa que posee un valor de significancia menor a 0.05 y automáticamente se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Por lo tanto, en esta investigación se decidió seguir los estudios del comportamiento de este metal en esta población, tomando sus resultados con cuidado ya que la no normalidad representa incertidumbre y desconfianza estadística.

Tabla 11. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcanicos del Plioceno.

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Statistic	Df	Sig.
Ln_Cu	.182	21	.067
Ln_Zn	.144	21	,200*
Ln_Ag	.220	21	.009
Ln_Pb	.102	21	,200*

*. *Este es un límite inferior a la verdadera significancia.*

a. *Corrección de significancia de Lilliefors.*

Cobre

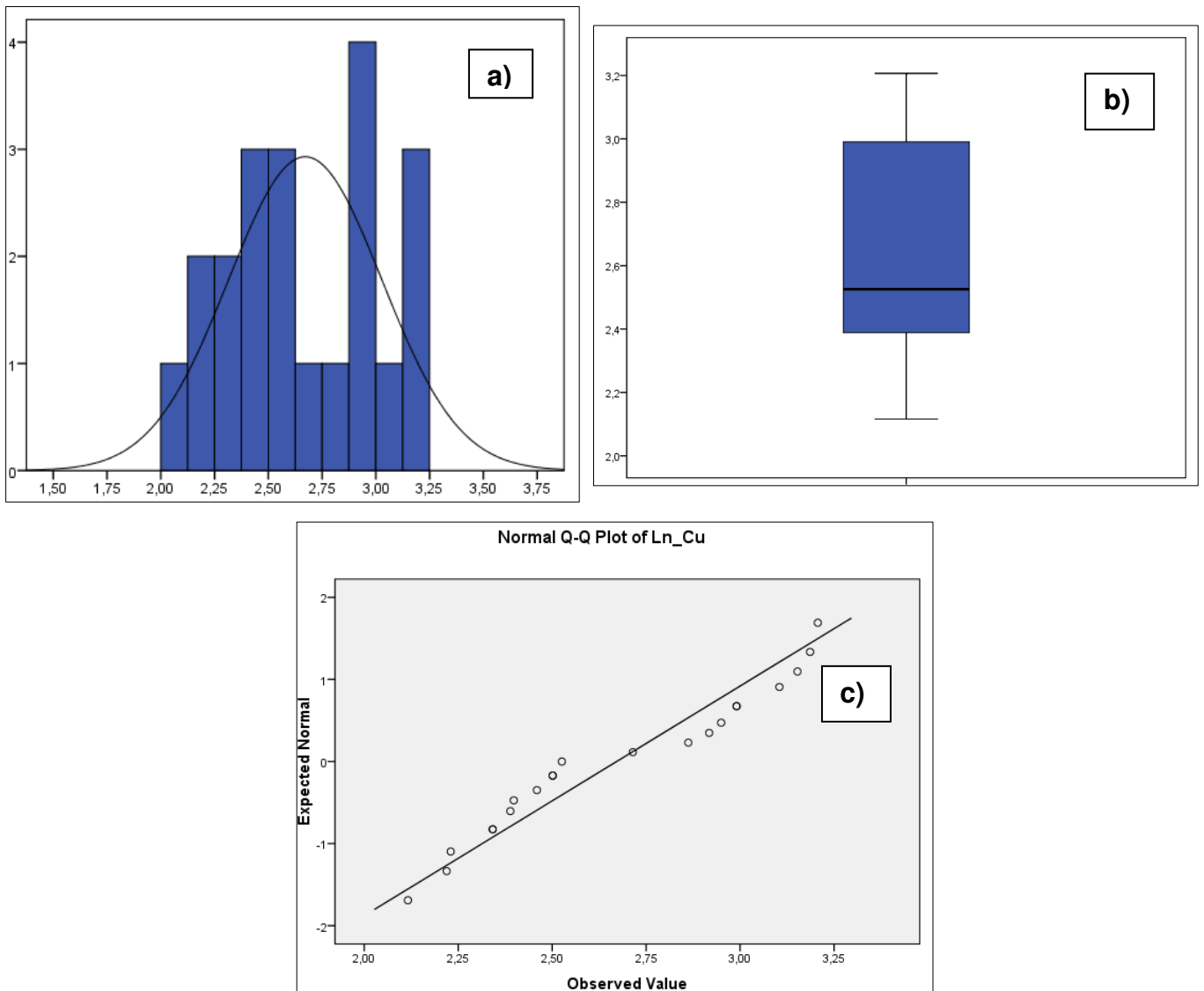


Figura 24. a) Histograma de frecuencias del Cu en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Cu en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Cu en los volcánicos del Plioceno.

Zinc

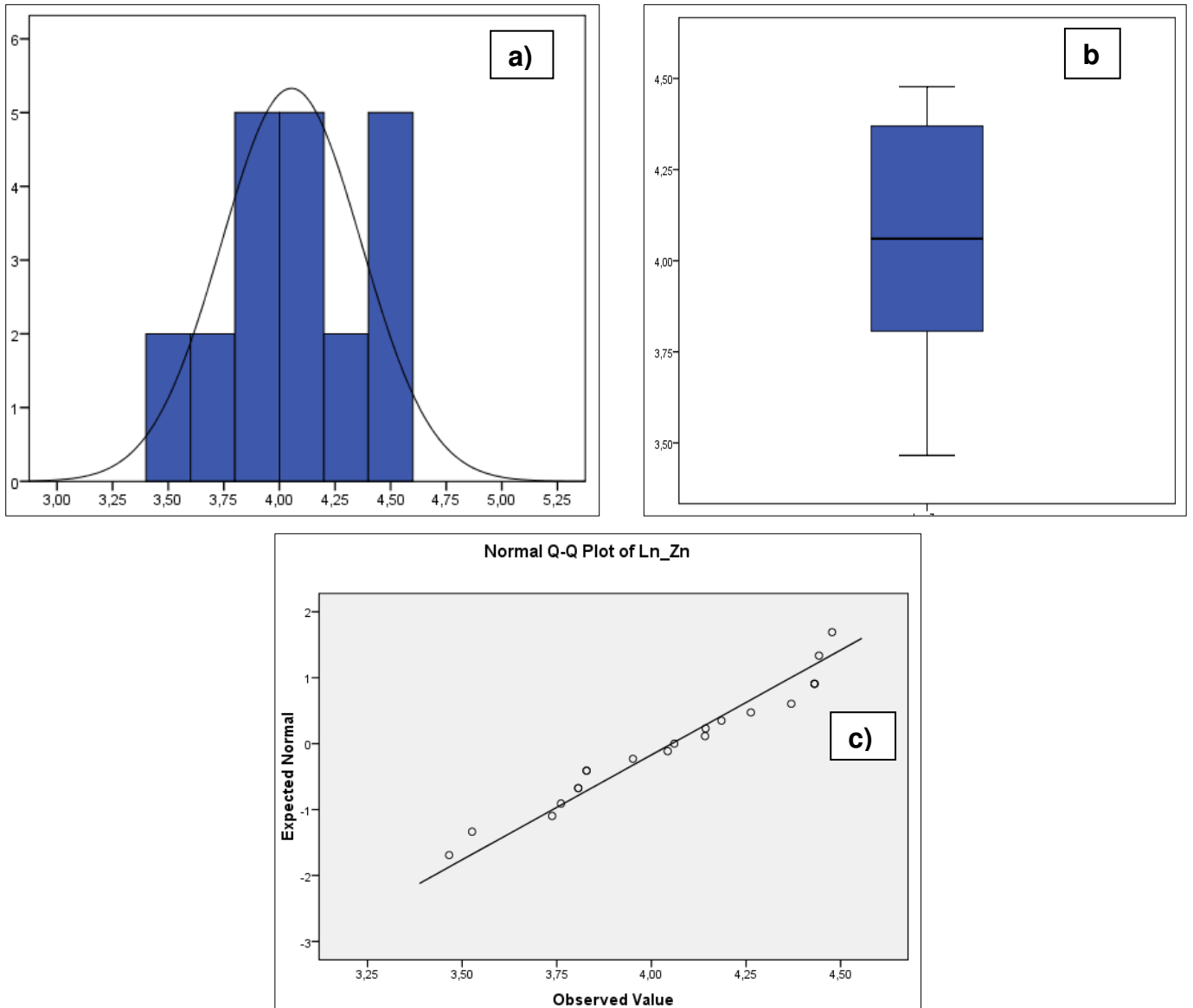


Figura 25. a) Histograma de frecuencias del Zn en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Zn en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Zn en los volcánicos del Plioceno.

Plata

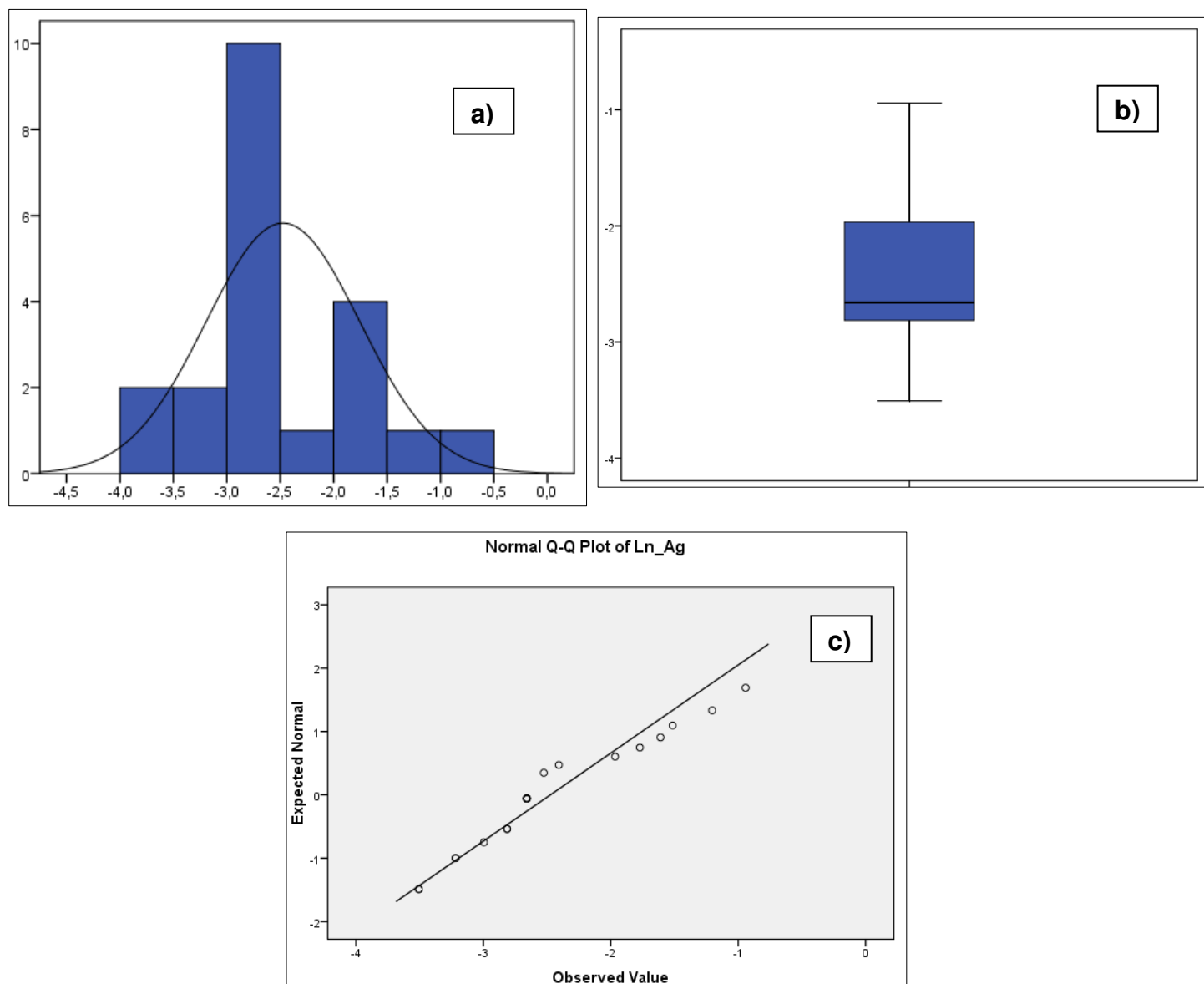


Figura 26. a) Histograma de frecuencias de la Ag en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas de la Ag en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad de la Ag en los volcánicos del Plioceno.

Plomo

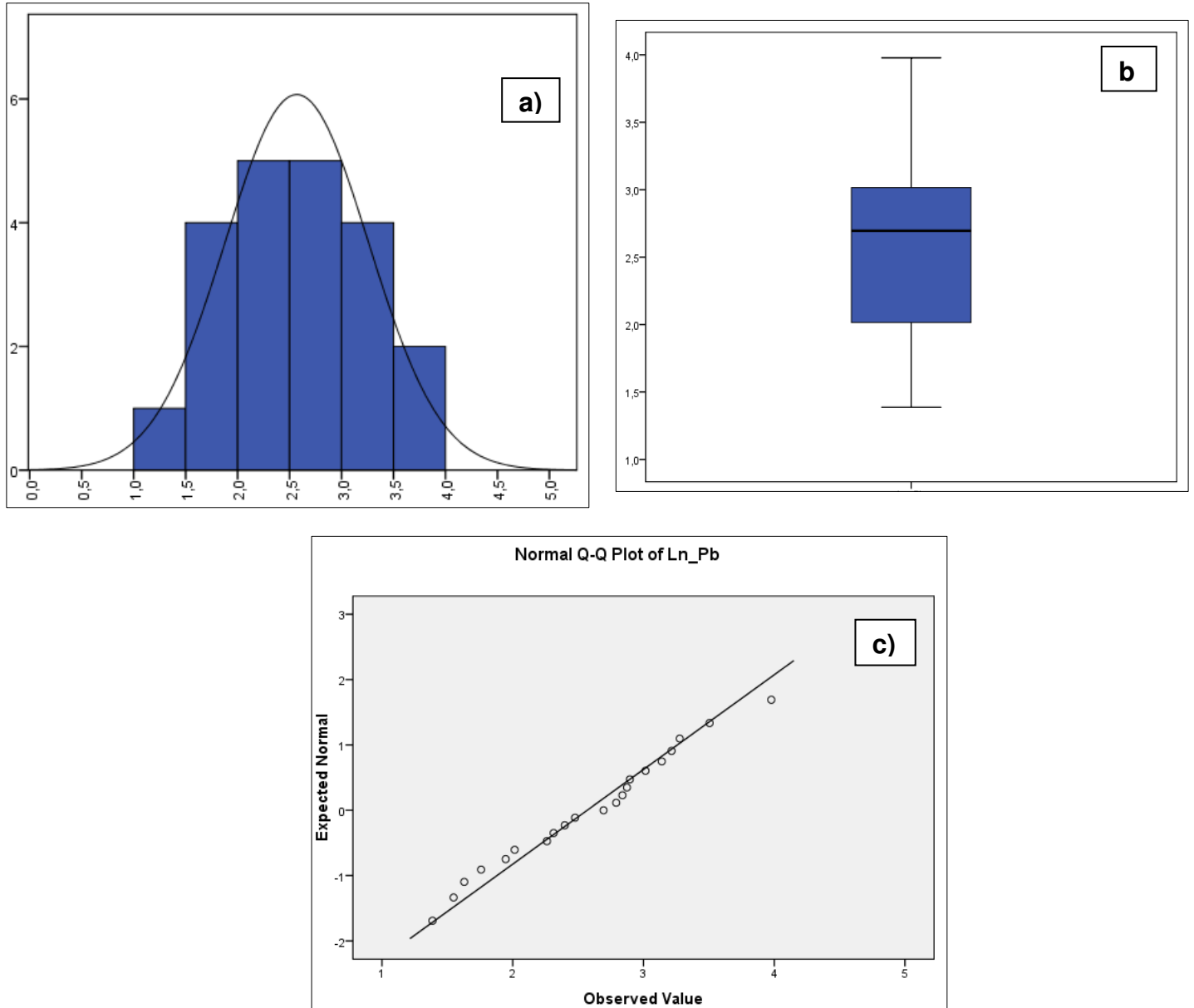


Figura 27. a) Histograma de frecuencias del Pb en los volcánicos del Plioceno, b) Diagrama de cajas del Pb en los volcánicos del Plioceno y c) Gráfico de normalidad del Pb en los volcánicos del Plioceno.

- **Resultado del procesamiento estadístico de los datos logarítmicos - Volcánicos del Mioceno**

El procesamiento estadístico de los datos logarítmicos de la subpoblación “Volcánicos del Mioceno” muestra que los metales base presentes en este dominio litoestratigráfico tienen una distribución lognormal (Figuras 28, 29, 30 y 31). Esto se confirma mediante la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov corregida de Lilliefors (tabla 12), la cual manifiesta valores de significancia mayores a 0.05 lo que acepta la hipótesis nula de normalidad (Dickinson y Chakraborti, 2003).

Sin embargo, esto no ocurre en el caso del Plomo, puesto que posee un valor de significancia igual a 0.044; menor a 0.05 y automáticamente se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Por lo tanto, en esta investigación se decidió seguir los estudios del comportamiento de este metal en esta población, tomando sus resultados con cuidado ya que la no normalidad representa incertidumbre y desconfianza estadística.

Tabla 12. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors de los Volcánicos del Mioceno.

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Statistic	df	Sig.
Ln_Cu	.139	25	,200*
Ln_Zn	.105	25	,200*
Ln_Ag	.148	25	.163
Ln_Pb	.176	25	.044

*. *Este es un límite inferior a la verdadera significancia.*

a. *Corrección de significancia de Lilliefors.*

Cobre

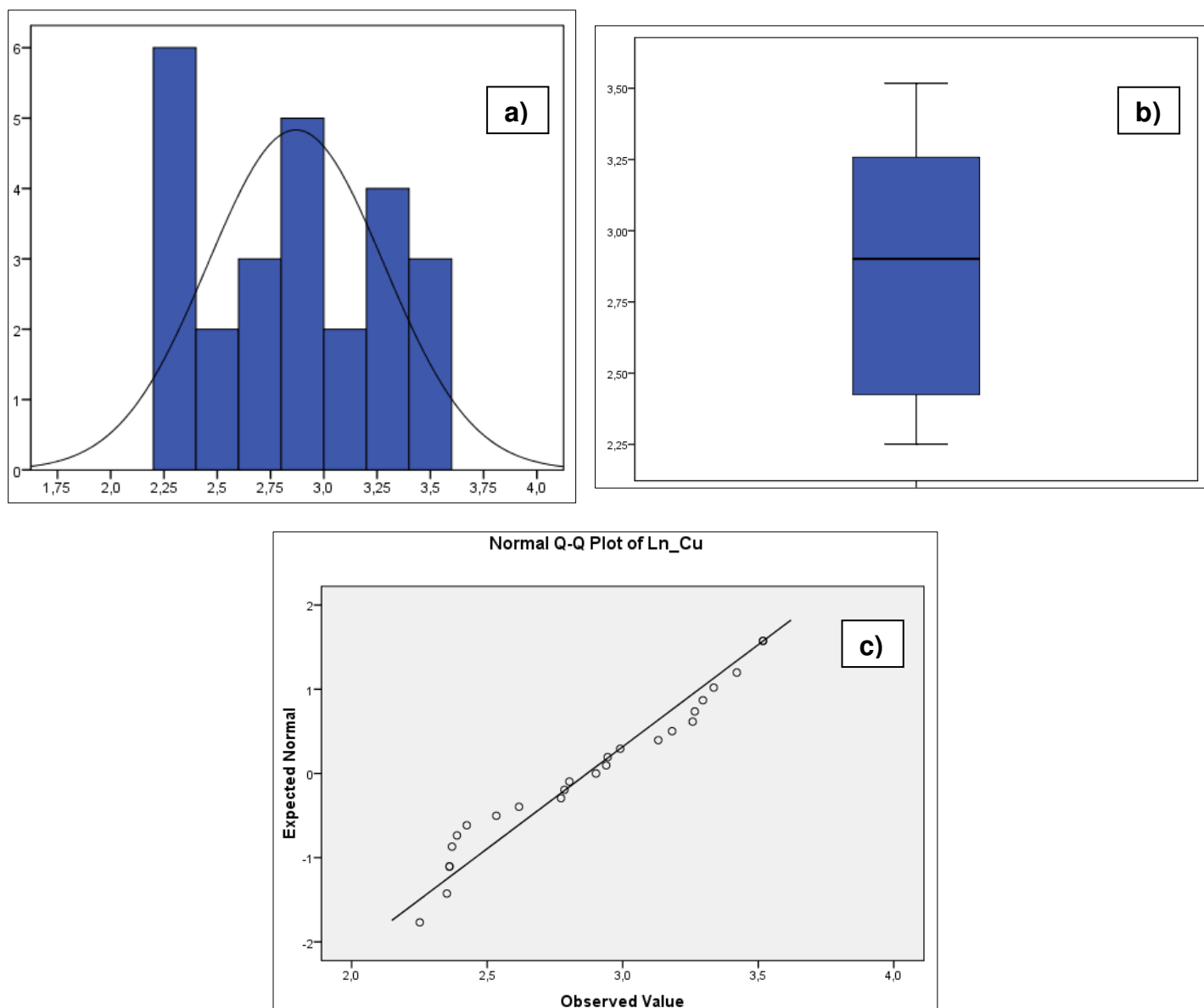


Figura 28. **a)** Histograma de frecuencias del Cu en los volcánicos del Mioceno, **b)** Diagrama de cajas del Cu en los volcánicos del Mioceno y **c)** Gráfico de normalidad del Cu en los volcánicos del Mioceno.

Zinc

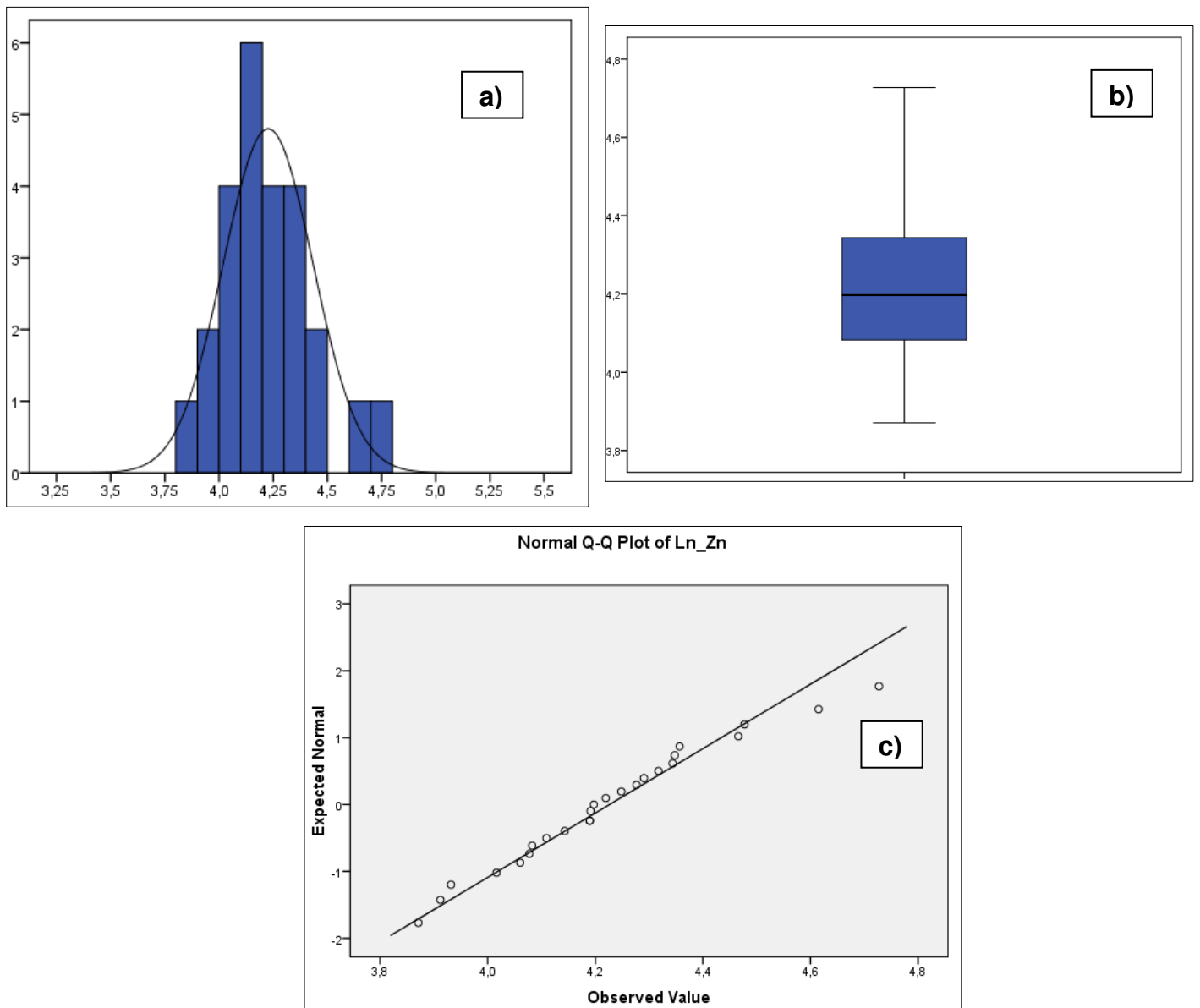


Figura 29. a) Histograma de frecuencias del Zn en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas del Zn en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad del Zn en los volcánicos del Mioceno

Plata

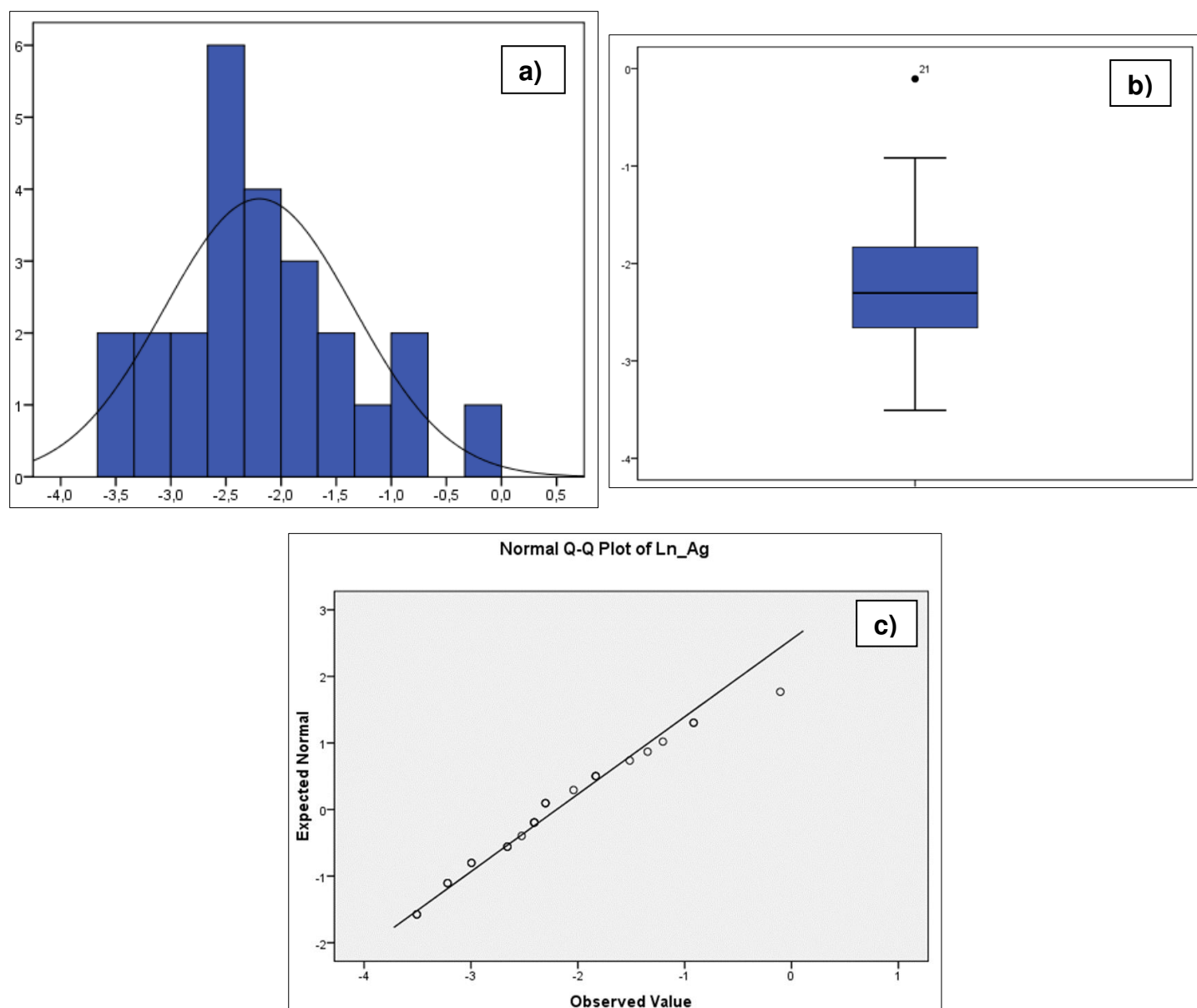


Figura 30. a) Histograma de frecuencias de la Ag en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas de la Ag en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad de la Ag en los volcánicos del Mioceno.

Plomo

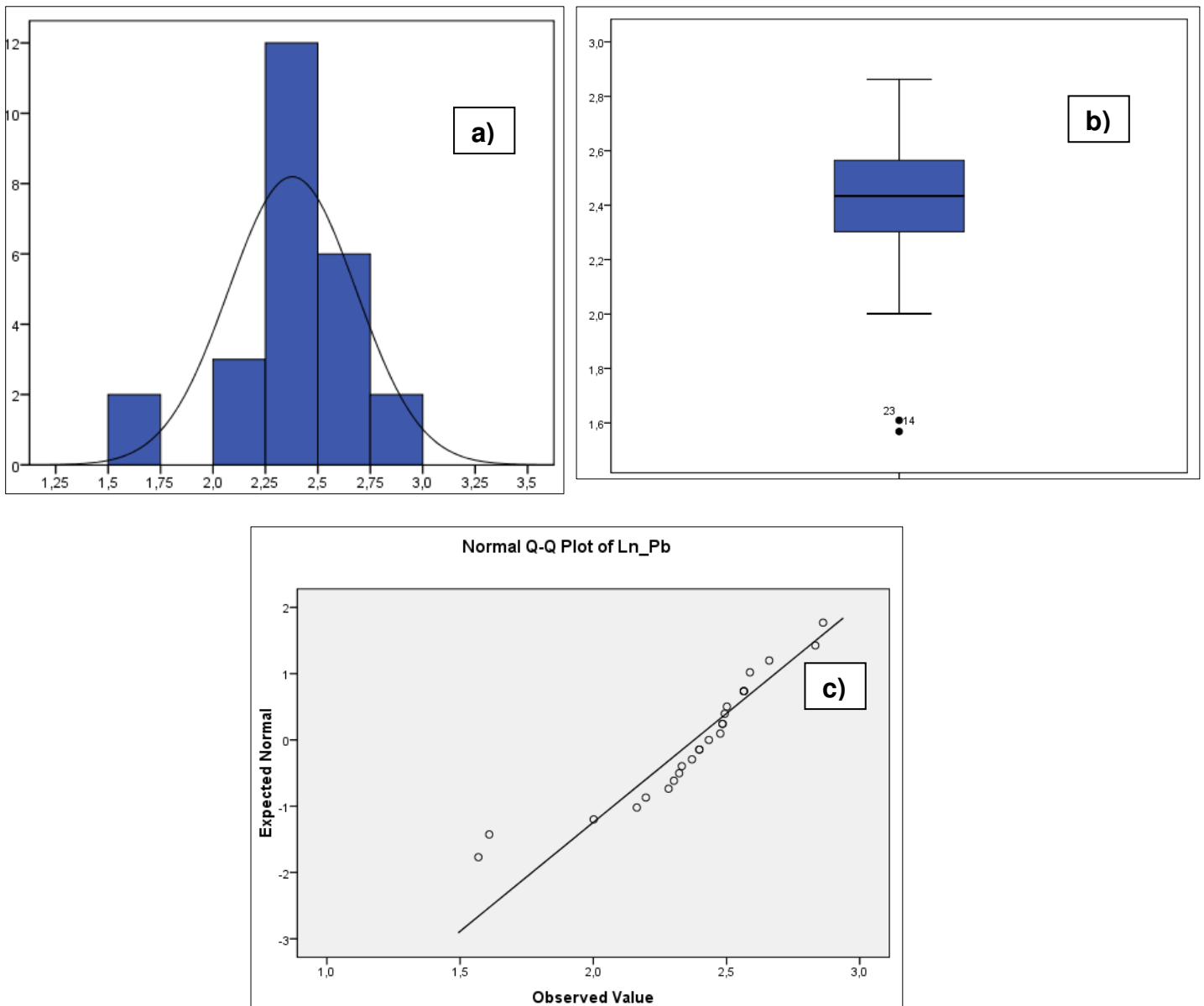


Figura 31. a) Histograma de frecuencias del Pb en los volcánicos del Mioceno, b) Diagrama de cajas del Pb en los volcánicos del Mioceno y c) Gráfico de normalidad del Pb en los volcánicos del Mioceno.

6.2. CORRELACIÓN BIVARIADA

Con la finalidad de determinar las relaciones estadísticas entre las variables, se procedió a calcular los coeficientes de correlación de Pearson. Cabe recalcar que se trabajó en base a los datos logarítmicos debido a la necesidad de trabajar con datos de comportamiento normal. En este contexto se observó que los coeficientes de Pearson mostraron un mayor grado de reciprocidad entre las variables. La realización de la correlación bivariada de Pearson se hizo mediante el software SPSS versión 23. Donde se correlacionaron 32 variables las cuales fueron depuradas quedándose con las 24 más importantes para cumplimiento de los objetivos de la investigación. Se ha clasificado entre correlaciones “fuertes” a los valores superiores a 0,6 y “débiles” para aquellos entre 0,3 y 0,6 (Plá, 2003). Para poder establecer relaciones geoquímicas más robustas se efectuó el cálculo del coeficiente de Pearson a cada población estadística (Volcánicos del Plioceno y Volcánicos del Mioceno), las cuales fueron descritas en los capítulos precedentes.

De antemano que se proceda con el cálculo de la “Correlación de Pearson”, se presenta en este apartado una breve descripción teórica de la misma.

- **Correlación de Pearson en el dominio litoestratigráfico Volcánicos del Plioceno**

Los resultados de la matriz de correlación de Pearson (Tabla 13), arrojaron buenos grados de correspondencia para los metales base y las otras variables. Tal es el caso de las fuertes correlaciones positivas con elementos mayores como son aluminio y calcio; y de las fuertes correlaciones negativas con sodio y potasio; esto podría indicar que en la red cristalina de los minerales esenciales formadores de roca hubo un reemplazamiento parcial de los cationes de metales base por estos elementos mayores debido a una alteración hidrotermal y posterior mineralización incipiente. Otra hipótesis es que en este dominio litoestratigráfico las rocas tengan presencia relativamente alta de minerales mena de metales base (óxidos o sulfuros).

Tabla 13. Matriz de correlación de Pearson de los Volcánicos del Plioceno.

	Ln_Al	Ln_Ca	Ln_Cu	Ln_Fe	Ln_Na	Ln_Sr	Ln_V	Ln_Zn	Ln_Ag	Ln_As	Ln_Be	Ln_Cd	Ln_Co	Ln_Hg	Ln_La	Ln_Mo	Ln_Ni	Ln_Pb	Ln_Sb	Ln_Sc	Ln_W	Ln_Y	Ln_Mn	Ln_K
Ln_Al	1.00	0.42	,618**	,536*	-0.18	0.34	,595**	,751**	-0.04	,464*	,845**	0.28	,778**	0.24	0.36	-,478*	,463*	0.39	0.07	,766**	-0.30	,769**	,628**	-,470*
Ln_Ca	0.42	1.00	,620**	,726**	,452*	0.20	0.38	,716**	,615**	,438*	,521*	0.43	,768**	,756**	0.28	-0.21	,652**	0.11	,568**	,547*	-0.26	,742**	,767**	-0.11
Ln_Cu	,618**	,620**	1.00	,560**	-0.03	,502*	,468*	,604**	0.33	,614**	,701**	0.16	,681**	,527*	0.31	-,527*	0.40	0.38	0.39	,690**	-0.26	,744**	,560**	-,471*
Ln_Fe	,536*	,726**	,560**	1.00	0.08	0.39	,813**	,670**	0.42	,576**	,744**	,542*	,757**	,657**	,761**	-0.03	,827**	,449*	,472*	,699**	0.04	,800**	,738**	-0.40
Ln_Na	-0.18	,452*	-0.03	0.08	1.00	-,629**	-0.25	0.38	,693**	-0.43	-0.27	0.39	0.09	0.21	-0.26	0.10	0.20	-,679**	,545*	-0.36	0.23	0.03	0.39	,661**
Ln_Sr	0.34	0.20	,502*	0.39	-,629**	1.00	0.36	-0.02	-0.23	,880**	,569**	-0.16	0.28	0.33	0.42	-0.33	0.03	,789**	-0.06	,693**	-0.31	,440*	0.00	-,578**
Ln_V	,595**	0.38	,468*	,813**	-0.25	0.36	1.00	,498*	0.18	0.43	,706**	,464*	,624**	0.41	,925**	-0.05	,800**	,561**	0.25	,676**	0.17	,714**	,535**	-,708**
Ln_Zn	,751**	,716**	,604**	,670**	0.38	-0.02	,498*	1.00	0.40	0.20	,648**	,547*	,860**	,444*	0.28	-0.43	,670**	0.02	0.40	,569**	-0.19	,744**	,895**	-0.14
Ln_Ag	-0.04	,615**	0.33	0.42	,693**	-0.23	0.18	0.40	1.00	-0.08	-0.06	,516*	0.28	,596**	0.17	0.13	,507*	-0.27	,831**	-0.03	0.32	0.28	,436*	0.21
Ln_As	,464*	,438*	,614**	,576**	-0.43	,880**	0.43	0.20	-0.08	1.00	,691**	-0.09	,465*	,469*	0.41	-0.19	0.18	,797**	0.01	,728**	-0.37	,544*	0.27	-,527*
Ln_Be	,845**	,521*	,701**	,744**	-0.27	,569**	,706**	,648**	-0.06	,691**	1.00	0.29	,792**	0.36	,544*	-0.40	,513*	,572**	0.11	,850**	-0.25	,847**	,641**	-,596**
Ln_Cd	0.28	0.43	0.16	,542*	0.39	-0.16	,464*	,547*	,516*	-0.09	0.29	1.00	0.35	,469*	,529*	-0.05	,587**	0.07	,724**	0.19	0.42	,465*	,435*	-0.01
Ln_Co	,778**	,768**	,681**	,757**	0.09	0.28	,624**	,860**	0.28	,465*	,792**	0.35	1.00	,461*	0.40	-0.36	,738**	0.22	0.28	,790**	-0.37	,883**	,905**	-,471*
Ln_Hg	0.24	,756**	,527*	,657**	0.21	0.33	0.41	,444*	,596**	,469*	0.36	,469*	,461*	1.00	,442*	-0.09	,502*	0.38	,657**	0.42	0.02	,520*	0.42	-0.13
Ln_La	0.36	0.28	0.31	,761**	-0.26	0.42	,925**	0.28	0.17	0.41	,544*	,529*	0.40	,442*	1.00	0.06	,707**	,634**	0.33	,570**	0.31	,596**	0.31	-,637**
Ln_Mo	-,478*	-0.21	-,527*	-0.03	0.10	-0.33	-0.05	-0.43	0.13	-0.19	-0.40	-0.05	-0.36	-0.09	0.06	1.00	0.02	-0.14	-0.05	-,473*	0.39	-0.34	-0.19	0.17
Ln_Ni	,463*	,652**	0.40	,827**	0.20	0.03	,800**	,670**	,507*	0.18	,513*	,587**	,738**	,502*	,707**	0.02	1.00	0.20	,484*	,584**	0.05	,711**	,712**	-0.43
Ln_Pb	0.39	0.11	0.38	,449*	-,679**	,789**	,561**	0.02	-0.27	,797**	,572**	0.07	0.22	0.38	,634**	-0.14	0.20	1.00	-0.07	,663**	-0.16	0.36	-0.05	-,694**
Ln_Sb	0.07	,568**	0.39	,472*	,545*	-0.06	0.25	0.40	,831**	0.01	0.11	,724**	0.28	,657**	0.33	-0.05	,484*	-0.07	1.00	0.07	0.40	0.40	0.38	0.13
Ln_Sc	,766**	,547*	,690**	,699**	-0.36	,693**	,676**	,569**	-0.03	,728**	,850**	0.19	,790**	0.42	,570**	-,473*	,584**	,663**	0.07	1.00	-,474*	,834**	,511*	-,712**
Ln_W	-0.30	-0.26	-0.26	0.04	0.23	-0.31	0.17	-0.19	0.32	-0.37	-0.25	0.42	-0.37	0.02	0.31	0.39	0.05	-0.16	0.40	-,474*	1.00	-0.22	-0.18	0.25
Ln_Y	,769**	,742**	,744**	,800**	0.03	,440*	,714**	,744**	0.28	,544*	,847**	,465*	,883**	,520*	,596**	-0.34	,711**	0.36	0.40	,834**	-0.22	1.00	,765**	-,539*
Ln_Mn	,628**	,767**	,560**	,738**	0.39	0.00	,535*	,895**	,436*	0.27	,641**	,435*	,905**	0.42	0.31	-0.19	,712**	-0.05	0.38	,511*	-0.18	,765**	1.00	-0.19
Ln_K	-,470*	-0.11	-,471*	-0.40	,661**	-,578**	-,708**	-0.14	0.21	-,527*	-,596**	-0.01	-,471*	-0.13	-,637**	0.17	-0.43	-,694**	0.13	-,712**	0.25	-,539*	-0.19	1.00

Correlación débil Correlación fuerte

Según se observa en la tabla 14, los metales base se correlacionan entre sí en grados moderado a intensos. De esta manera, los metales base más afines son el cobre y el zinc (coeficiente de Pearson = 0.6).

Tabla 14. Correlación de Pearson de los metales base de los Volcánicos del Plioceno.

	Débil	Fuerte
Cobre	Fe, Sr, V, Ag, Hg, La, Mo, Ni, Pb, Sb, Mn, K	Al, Ca, Zn, As, Be, Co, Sc, Y
Plata	Cu, Fe, Cd, Hg, Ni, W, Mn	Ca, Na, Sb
Plomo	Al, Cu, Fe, V, Be, Hg, Y	Na, Sr, As, La, Sc, K
Zinc	Na, V, Ag, Cd, Hg, Mo, Sb	Al, Ca, Cu, Fe, Be, Co, Ni, Sc, Y, Mn

Por otra parte, se tiene correlaciones débiles entre Cu-Ag y Ag-Zn, los cuales a su vez se correlacionan fuertemente con el calcio y moderadamente con el manganeso y aluminio. Es importante mencionar que la correlación positiva más importante de la Plata es con el antimonio (coeficiente de Pearson = 0.83) y moderadamente con el mercurio y manganeso. Dicha filiación resulta interesante debido a que son típicas de depósitos epitermales de baja sulfuración.

Por su parte el Plomo muestra filiaciones resaltantes con el estroncio, el arsénico, el mercurio y el cobre. Estas relaciones también se manifiestan en depósitos epitermales de baja sulfuración.

- **Correlación de Pearson en el dominio litoestratigráfico Volcánicos del Mioceno**

Según la matriz de correlación de Pearson de los sedimentos de naturaleza volcánica del Mioceno (Tabla 16), la filiación geoquímica de los metales base más interesante ocurrió entre el cobre y el cobalto (coeficiente de Pearson de 0.82), se presume que se debe a la similitud en los pesos específicos de ambos metales (ambiente secundario), por otra parte estos metales están ligados genéticamente por ser elementos altamente calcófilos y por esta razón se cree que a lo largo de la extensión del dominio litoestratigráfico “Volcánicos del Mioceno” existe evidencias de mineralización sulfurada.

De acuerdo a la tabla 15, los principales elementos correlacionados directamente con el cobre son el cobalto, el berilo y el itrio, con coeficientes de 0.82, 0.75 y 0.74 respectivamente. Cabe mencionar que la correlación inversa de mayor importancia con este elemento fue con el tungsteno (-0.52).

Tabla 15. Correlación de Pearson de los metales base de los Volcánicos del Mioceno.

	Débil	Fuerte
Cobre	Fe, Sr, Ti, Zn, As, Bi, Cd, Hg, La, Sb, W	Al, Mn, Be, Co, Ni, Sc, Y
Plata	Cr, As, Be, Bi, Cd, La, Mo, Pb, W	Sr, Sb
Plomo	Al, Ag	-
Zinc	Al, Cu, Mn, V, Co, Hg, Ni	Fe

En cuanto a la plata, posee un índice de correlación directa con el antimonio de 0.68 (el más alto). Además, es relevante comentar que tiene un valor de correlación inversa de -0.64 con el estroncio.

Por otra parte, el plomo no posee índices de correlación fuerte, solo de intensidad débil con la plata y el aluminio.

Por último, se observa que el zinc se correlaciona positivamente con fuerte intensidad con el hierro y el índice de correlación negativa más alto que tiene es con el mercurio (-0.46).

Tabla 16. Matriz de correlación de Pearson de los Volcánicos del Mioceno.

	Ln_Al	Ln_Cr	Ln_Cu	Ln_Fe	Ln_Mn	Ln_Sr	Ln_Ti	Ln_V	Ln_Zn	Ln_Ag	Ln_As	Ln_Be	Ln_Bi	Ln_Cd	Ln_Co	Ln_Hg	Ln_La	Ln_Mo	Ln_Ni	Ln_Pb	Ln_Sb	Ln_Sc	Ln_W	Ln_Y
Ln_Al	1.00	-0.19	,705**	0.39	,433*	,547**	-0.14	0.10	0.35	-0.24	0.28	,682**	-0.33	-,417*	,600**	-,407*	0.18	-0.08	0.34	0.33	-,510**	,601**	-,584**	,542**
Ln_Cr	-0.19	1.00	-0.05	0.28	-0.30	-,602**	0.20	,575**	0.21	,568**	-,625**	-,451*	,696**	,789**	-0.09	-0.32	,437*	-0.38	0.31	0.09	,572**	-0.23	,735**	-0.25
Ln_Cu	,705**	-0.05	1.00	,540**	,675**	0.32	-,398*	-0.02	0.34	0.03	0.38	,747**	-0.37	-0.39	,820**	-,506**	0.34	-0.19	,686**	0.22	-0.31	,637**	-,516**	,740**
Ln_Fe	0.39	0.28	,540**	1.00	,527**	0.12	-0.19	,506**	,805**	0.11	-0.08	,457*	0.20	0.20	,760**	-,456*	0.38	-0.06	,678**	0.11	0.12	0.35	-0.02	,427*
Ln_Mn	,433*	-0.30	,675**	,527**	1.00	0.39	-,439*	-0.16	0.39	-0.01	,423*	,786**	-,552**	-0.35	,798**	-0.27	0.22	-0.05	,640**	-0.01	-0.32	,682**	-,517**	,845**
Ln_Sr	,547**	-,602**	0.32	0.12	0.39	1.00	0.24	0.12	0.14	-,637**	,476*	,573**	-,699**	-,670**	,418*	-0.06	-0.09	-0.03	0.23	-0.20	-,618**	,746**	-,761**	,592**
Ln_Ti	-0.14	0.20	-,398*	-0.19	-,439*	0.24	1.00	,681**	0.07	-0.14	-,450*	-,535**	0.05	0.11	-0.35	-0.13	0.01	-0.36	-0.09	-0.29	0.07	0.04	0.28	-0.23
Ln_V	0.10	,575**	-0.02	,506**	-0.16	0.12	,681**	1.00	,559**	0.10	-,556**	-0.27	,400*	,472*	0.12	-0.35	0.30	-,478*	0.36	-0.08	0.32	0.14	,414*	-0.01
Ln_Zn	0.35	0.21	0.34	,805**	0.39	0.14	0.07	,559**	1.00	0.11	-0.06	0.24	0.15	0.18	,490*	-,458*	0.25	-0.15	,440*	0.23	0.11	0.27	0.08	0.28
Ln_Ag	-0.24	,568**	0.03	0.11	-0.01	-,637**	-0.14	0.10	0.11	1.00	-0.34	-0.30	,508**	,576**	-0.15	-0.07	,549**	-0.30	0.01	0.36	,679**	-0.26	,548**	-0.08
Ln_As	0.28	-,625**	0.38	-0.08	,423*	,476*	-,450*	-,556**	-0.06	-0.34	1.00	,605**	-,573**	-,583**	0.30	0.11	-0.22	0.28	0.07	0.05	-0.36	0.38	-,715**	,472*
Ln_Be	,682**	-,451*	,747**	,457*	,786**	,573**	-,535**	-0.27	0.24	-0.30	,605**	1.00	-,605**	-,588**	,794**	-0.22	0.19	0.14	,480*	0.04	-,591**	,750**	-,831**	,791**
Ln_Bi	-0.33	,696**	-0.37	0.20	-,552**	-,699**	0.05	,400*	0.15	,508**	-,573**	-,605**	1.00	,866**	-0.35	0.13	0.15	-0.07	-0.20	0.28	,806**	-,679**	,816**	-,623**
Ln_Cd	-,417*	,789**	-0.39	0.20	-0.35	-,670**	0.11	,472*	0.18	,576**	-,583**	-,588**	,866**	1.00	-0.30	0.09	0.20	-0.30	0.00	0.14	,825**	-,496*	,865**	-,415*
Ln_Co	,600**	-0.09	,820**	,760**	,798**	,418*	-0.35	0.12	,490*	-0.15	0.30	,794**	-0.35	-0.30	1.00	-,487*	0.20	0.01	,833**	0.06	-0.32	,648**	-,522**	,707**
Ln_Hg	-,407*	-0.32	-,506**	-,456*	-0.27	-0.06	-0.13	-0.35	-,458*	-0.07	0.11	-0.22	0.13	0.09	-,487*	1.00	-,397*	0.15	-,549**	0.05	0.14	-,404*	0.10	-0.28
Ln_La	0.18	,437*	0.34	0.38	0.22	-0.09	0.01	0.30	0.25	,549**	-0.22	0.19	0.15	0.20	0.20	-,397*	1.00	-0.37	0.28	0.10	0.23	0.37	0.10	,406*
Ln_Mo	-0.08	-0.38	-0.19	-0.06	-0.05	-0.03	-0.36	-,478*	-0.15	-0.30	0.28	0.14	-0.07	-0.30	0.01	0.15	-0.37	1.00	-0.26	0.04	-0.20	-0.30	-0.26	-0.30
Ln_Ni	0.34	0.31	,686**	,678**	,640**	0.23	-0.09	0.36	,440*	0.01	0.07	,480*	-0.20	0.00	,833**	-,549**	0.28	-0.26	1.00	-0.11	-0.10	,615**	-0.20	,611**
Ln_Pb	0.33	0.09	0.22	0.11	-0.01	-0.20	-0.29	-0.08	0.23	0.36	0.05	0.04	0.28	0.14	0.06	0.05	0.10	0.04	-0.11	1.00	0.23	-0.17	0.08	-0.10
Ln_Sb	-,510**	,572**	-0.31	0.12	-0.32	-,618**	0.07	0.32	0.11	,679**	-0.36	-,591**	,806**	,825**	-0.32	0.14	0.23	-0.20	-0.10	0.23	1.00	-,537**	,757**	-,409*
Ln_Sc	,601**	-0.23	,637**	0.35	,682**	,746**	0.04	0.14	0.27	-0.26	0.38	,750**	-,679**	-,496*	,648**	-,404*	0.37	-0.30	,615**	-0.17	-,537**	1.00	-,685**	,869**
Ln_W	-,584**	,735**	-,516**	-0.02	-,517**	-,761**	0.28	,414*	0.08	,548**	-,715**	-,831**	,816**	,865**	-,522**	0.10	0.10	-0.26	-0.20	0.08	,757**	-,685**	1.00	-,582**
Ln_Y	,542**	-0.25	,740**	,427*	,845**	,592**	-0.23	-0.01	0.28	-0.08	,472*	,791**	-,623**	-,415*	,707**	-0.28	,406*	-0.30	,611**	-0.10	-,409*	,869**	-,582**	1.00

Correlación débil Correlación fuerte

6.3. ANALISIS MULTIVARIADO

Debido a la necesidad de establecer relaciones entre variables y con el fin de determinar cuáles son realmente los grupos de variables que explican el comportamiento de cada una de las poblaciones, se realizó el análisis multivariado a las muestras de la microcuenca Chahuarma. El método que se utilizó es el ya conocido “*Análisis de Componentes Principales*”.

Dicho análisis se realizó solo a 24 variables de 32 totales, descartando a los elementos mayores (Al, Ca, Mg, Fe, Na, K y Ti) así como también al Oro, variable que presentó más del 5 % de sus valores menores al límite de detección inferior.

Sin embargo, cabe indicar que previo al cálculo de las componentes principales, se procedió a transformar las variables a escala logarítmica. Ya que, como se explicó anteriormente en el área de estudio actual, las variables geoquímicas poseen comportamiento log-normal.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos en el procesamiento del análisis de componentes principales de cada una de las poblaciones estadísticas determinadas anteriormente.

- **Análisis multivariado del dominio litoestratigráfico: Volcánicos del Plioceno:**

A partir del análisis de componentes principales de este dominio, se obtuvo 3 tablas que brindan información para la interpretación geoquímica de los datos. La primera tabla obtenida, es la matriz de comunalidades (tabla 17). Esta muestra la proporción de variabilidad con la que se explica la varianza de la variable, comparando la proporción original con la proporción de extracción. Es de esta manera que observamos que para las variables estudiadas se obtuvieron valores aceptables, que varían en un rango de 0.443 a 0.966, siendo el mínimo para el Estaño y el máximo para el Lantano.

Tabla 17. Matriz de comunalidades de los Volcánicos del Plioceno.

	Initial	Extraction
Ln_Cr	1.000	.816
Ln_Cu	1.000	.817
Ln_Mn	1.000	.955
Ln_P	1.000	.822
Ln_Sr	1.000	.919
Ln_V	1.000	.959
Ln_Zn	1.000	.919
Ln_Zr	1.000	.758
Ln_Ag	1.000	.819
Ln_As	1.000	.947
Ln_Be	1.000	.883
Ln_Bi	1.000	.896
Ln_Cd	1.000	.795
Ln_Co	1.000	.953
Ln_Hg	1.000	.848
Ln_La	1.000	.966
Ln_Mo	1.000	.882
Ln_Ni	1.000	.907
Ln_Pb	1.000	.902
Ln_Sb	1.000	.933
Ln_Sc	1.000	.900
Ln_Sn	1.000	.443
Ln_Y	1.000	.885

Por otra parte, se obtuvo la matriz de varianza total explicada (tabla 18), la cual entrega la varianza asociada a cada factor o componente y se utiliza para determinar cuántos factores deben retenerse. Es así que los factores que poseen autovalores mayores a 1 deben ser tomados en cuenta (Kaiser, 1974).

De esta manera, que se obtuvo 5 factores que explican la varianza en 86.617 %, donde el primer factor posee la mayor varianza y el ultimo la menor. Por lo tanto, hubo una pérdida del 13.38 % de información, que se puede considerar aceptable según Kaiser.

A continuación, se detalla el porcentaje de varianza total explicada por cada componente:

- Componente 1: 40.649 %
- Componente 2: 18.606 %
- Componente 3: 12.797 %
- Componente 4: 8.590 %
- Componente 5: 5.947 %

Tabla 18. Varianza total explicada de los Volcánicos del Plioceno.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas cuadradas			Rotacion de sumas de carga cuadrada		
	Total	% de Varianza	% Acumulado	Total	% de Varianza	% Acumulado	Total	% de Varianza	% Acumulado
1	9.349	40.649	40.649	9.349	40.649	40.649	6.029	26.211	26.211
2	4.279	18.606	59.256	4.279	18.606	59.256	4.706	20.461	46.673
3	2.943	12.797	72.053	2.943	12.797	72.053	3.786	16.462	63.134
4	1.976	8.590	80.643	1.976	8.590	80.643	3.450	15.001	78.136
5	1.374	5.974	86.617	1.374	5.974	86.617	1.951	8.481	86.617
6	.836	3.635	90.252						
7	.506	2.200	92.452						
8	.470	2.043	94.495						
9	.344	1.498	95.992						
10	.340	1.478	97.470						
11	.177	.768	98.238						
12	.140	.608	98.846						
13	.115	.502	99.348						
14	.059	.255	99.603						
15	.038	.167	99.770						
16	.024	.103	99.873						
17	.012	.051	99.924						
18	.010	.045	99.969						
19	.004	.018	99.987						
20	.003	.013	100.000						
21	3.207E-16	1.394E-15	100.000						
22	1.609E-16	6.994E-16	100.000						
23	-2.111E-16	-9.178E-16	100.000						

Finalmente se obtuvo la matriz de componentes rotados (tabla 19), la cual muestra la correlación de cada factor con solo unas cuantas variables.

De esta manera se estableció las siguientes asociaciones geoquímicas, sean estas positivas o negativas, según la relación directa o inversa que toman con los factores.

- Componente 1: Mn – Co – Zn – Y- Ni – Be – Sc
- Componente 2: Sr – As – Pb – Sc
- Componente 3: Cr – La – Bi – V
- Componente 4: Sb – Ag – Hg – Cd

Tabla 19. Matriz de componentes rotados de los Volcánicos del Plioceno.

	Componentes				
	1	2	3	4	5
Ln_Mn	.949			.223	
Ln_Co	.936	.226		.139	
Ln_Zn	.877			.313	.223
Ln_Y	.766	.412	.156	.290	.143
Ln_Ni	.702		.522	.345	-.138
Ln_Be	.698	.555	.141		.259
Ln_Zr	.597	.311	.292	-.185	.430
Ln_Cu	.588	.498	-.216	.321	.271
Ln_Sr		.944			.145
Ln_As	.306	.909	-.135		
Ln_Pb		.899	.291		
Ln_Sc	.622	.662	.133		.238
Ln_Cr			.893	-.127	
Ln_La	.276	.486	.774	.231	
Ln_Bi	-.117		.702	.469	.412
Ln_V	.557	.398	.691	.104	
Ln_P		.405	-.678	-.228	.379
Ln_Sb	.163			.946	
Ln_Ag	.271	-.207		.803	-.242
Ln_Hg	.280	.451		.719	-.219
Ln_Cd	.273	-.104	.466	.690	.128
Ln_Mo	-.253	-.206	.333		-.811
Ln_Sn	.117		.223	-.208	.579

- **Análisis multivariado del dominio litoestratigráfico: Volcánicos del Mioceno**

Al igual que el dominio anterior, se obtuvo 3 matrices. La primera matriz, la de comunalidades (tabla 20) en la cual se obtuvieron valores aceptables de proporción de variabilidad, que varían en un rango de 0.694 a 0.970, siendo el mínimo para el Lantano y el máximo para el Vanadio.

Tabla 20. Matriz de comunalidades de los Volcánicos del Mioceno.

	Initial	Extraction
Ln_Cr	1.000	.908
Ln_Cu	1.000	.885
Ln_Mn	1.000	.872
Ln_P	1.000	.917
Ln_Sr	1.000	.940
Ln_V	1.000	.970
Ln_Zn	1.000	.812
Ln_Zr	1.000	.876
Ln_Ag	1.000	.847
Ln_As	1.000	.710
Ln_Be	1.000	.911
Ln_Bi	1.000	.902
Ln_Cd	1.000	.893
Ln_Co	1.000	.919
Ln_Hg	1.000	.792
Ln_La	1.000	.694
Ln_Mo	1.000	.814
Ln_Ni	1.000	.790
Ln_Pb	1.000	.841
Ln_Sb	1.000	.856
Ln_Sc	1.000	.929
Ln_Sn	1.000	.916
Ln_W	1.000	.926
Ln_Y	1.000	.950

La segunda matriz que se obtuvo, fue la matriz de varianza total explicada (tabla 21), donde la varianza total explicada fue de 86.9 %, que según Káiser es aceptable. Esta matriz muestra 6 factores con autovalores mayores a 1, siendo sus porcentajes de varianza los siguientes:

- Componente 1: 38.871 %
- Componente 2: 20.996 %
- Componente 3: 11.223 %
- Componente 4: 6.086 %
- Componente 5: 5.423 %
- Componente 6: 4.358 %

Por último, se obtuvo la matriz de componentes rotados (tabla 22), la cual estableció las siguientes asociaciones geoquímicas:

- Componente 1: Mn – Y- Co – Be – P – Cu – Sc - Ni
- Componente 2: Cd – Sb – W – Bi – Ag - Cr
- Componente 3: Sn – Zr
- Componente 4: V - Zn

Como se observa, el 5to y 6to componente, no presentan asociaciones geoquímicas. Esto se debe a que se tomó como criterio de asociación geoquímica a valores de correlación mayores a 0.600, para mayor confiabilidad en la interpretación (Pla, 2003).

Tabla 21. Matriz de varianza total explicada de los Volcánicos del Mioceno.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas cuadradas			Rotacion de sumas de carga cuadrada		
	Total	% de Varianza	% Acumulado	Total	% de Varianza	% Acumulado	Total	% de Varianza	% Acumulado
1	9.329	38.871	38.871	9.329	38.871	38.871	6.638	27.657	27.657
2	5.039	20.996	59.867	5.039	20.996	59.867	6.201	25.836	53.493
3	2.693	11.223	71.090	2.693	11.223	71.090	2.471	10.297	63.790
4	1.461	6.086	77.176	1.461	6.086	77.176	2.049	8.538	72.328
5	1.302	5.423	82.600	1.302	5.423	82.600	1.769	7.369	79.697
6	1.046	4.358	86.958	1.046	4.358	86.958	1.743	7.260	86.958
7	.815	3.397	90.355						
8	.510	2.124	92.479						
9	.470	1.958	94.437						
10	.355	1.480	95.916						
11	.284	1.185	97.101						
12	.217	.904	98.005						
13	.184	.767	98.772						
14	.107	.444	99.216						
15	.068	.285	99.501						
16	.033	.140	99.641						
17	.027	.111	99.752						
18	.024	.101	99.854						
19	.015	.064	99.918						
20	.008	.034	99.952						
21	.006	.025	99.977						
22	.005	.019	99.996						
23	.001	.004	100.000						
24	2.005E-05	8.354E-05	100.000						

Tabla 22. Matriz de componentes rotados de los Volcánicos del Mioceno.

	Componentes					
	1	2	3	4	5	6
Ln_Mn	.906	-.168	-.149			
Ln_Y	.898	-.283	.244			
Ln_Co	.794	-.194	-.181	.285	.101	.357
Ln_Be	.790	-.474	-.187		.145	
Ln_P	.752	-.244		.422	-.337	
Ln_Cu	.751	-.206			.335	.396
Ln_Sc	.749	-.449	.355		-.128	.122
Ln_Ni	.677			.287		.484
Ln_La	.533	.467	.368	-.157		.159
Ln_Cd	-.234	.883		.215		
Ln_Sb	-.151	.867		.119	.108	-.234
Ln_W	-.470	.816	.124	.136		
Ln_Bi	-.394	.809		.231	.182	
Ln_Ag	.143	.801	.201	-.278	.259	
Ln_Sr	.369	-.767	.227	.333	-.140	-.186
Ln_Cr	-.127	.759	.283	.117		.471
Ln_As	.391	-.555	-.235	-.193	.275	-.286
Ln_Mo	-.178	-.246	-.848			
Ln_Sn	-.490	.133	.665	.139	.411	.168
Ln_Zr		-.306	.627	.400	-.440	.188
Ln_V		.324	.472	.748	-.186	.220
Ln_Zn	.401	.181		.730	.240	.167
Ln_Pb		.164			.900	
Ln_Hg	-.335			-.157		-.802

6.4. PATRONES DE DISPERSIÓN GEOQUÍMICA

“Las características de los patrones de dispersión geoquímica de los metales base en sedimentos activos de corriente, son consecuencias naturales de los procesos dinámicos de dispersión” (Vargas, Chira & Chero, 2008, p.2). Los patrones de dispersión geoquímica estudiados en la presente investigación son del tipo epigenético clástico - hidromórfico, de acuerdo al agente dinámico que las genera (aguas de escorrentía).

Se determinaron los patrones de dispersión geoquímica secundaria a lo largo de 3 principales drenajes, constituidos por los ríos Condorpaccha, Chicchina y Supaymayo con longitudes de escorrentía que varían entre los 28 a 32 km. Se evaluaron valores geoquímicos de 17 estaciones de muestreo para los drenajes Condorpaccha y Chicchina, mientras tanto en el río Supamayo se evaluaron 13 estaciones.

Dichos patrones geoquímicos fueron representados en diagramas de concentraciones, haciendo un contraste con la variabilidad de sus parámetros fisicoquímicos y la geología de la cuenca. Es propicio indicar que para representar las concentraciones de la Plata se multiplicó su valor original por 100, con el fin de alcanzar la escala mostrada por los otros elementos.

Se observa que en general las concentraciones del Cu, Pb y Zn decrecen progresivamente a medida que se alejan de la cabecera de cuenca (Figuras 32, 33 y 34). Esto se puede explicar debido a que en las cotas más altas afloran rocas de los Grupos Mitú y Pucara (dominio litoestratigráfico sedimentarios del Pérmico – Triásico), las cuales tienen un valor de fondo de metales base más alto que los otros dominios presentes en la cuenca de estudio.

Por otro lado, también se nota que la variabilidad de la Plata es más errática y sus valores aumentan y disminuyen drásticamente, esto se debe a que tiende a concentrarse en puntos

específicos, dado a su baja solubilidad y reacción. Sin embargo, esto no descarta la tendencia al decaimiento de sus valores a medida que se aleja de la cabecera de cuenca. Las aguas de los drenajes seleccionados discurren a través de tres dominios litoestratigráficos bien definidos (sedimentarios del Pérmico-Triásico, volcánicos del Mioceno y volcánicos del Plioceno). La naturaleza de dichas aguas es alcalina, con un rango de pH que varía entre 7.4 y 10.7. Además de una conductividad eléctrica variable (28 – 1488 ms/cm), lo cual indica una considerable tasa de sólidos disueltos.

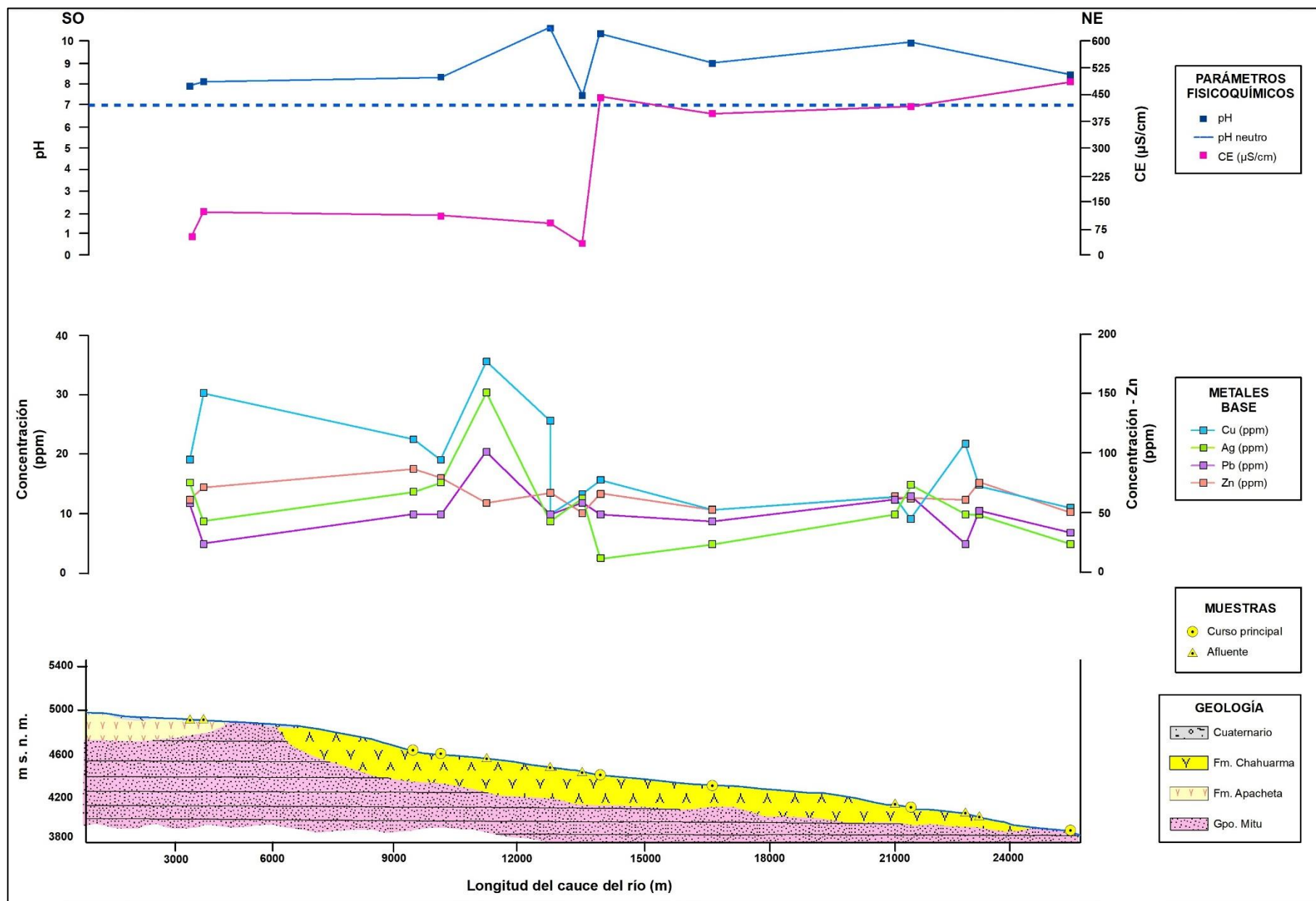


Figura 32. Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Río Condorpaccha.

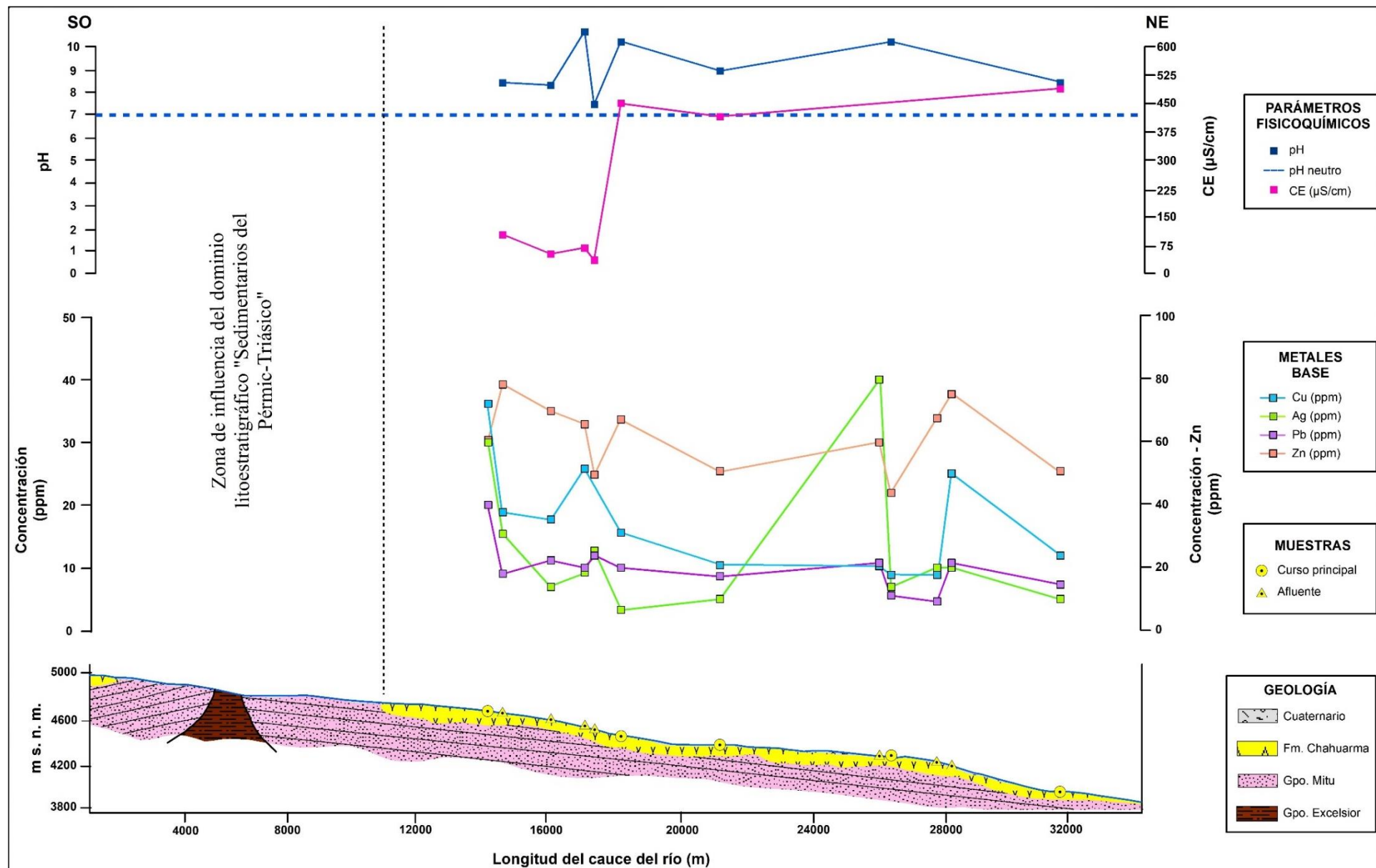


Figura 33. Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Río Chicchina.

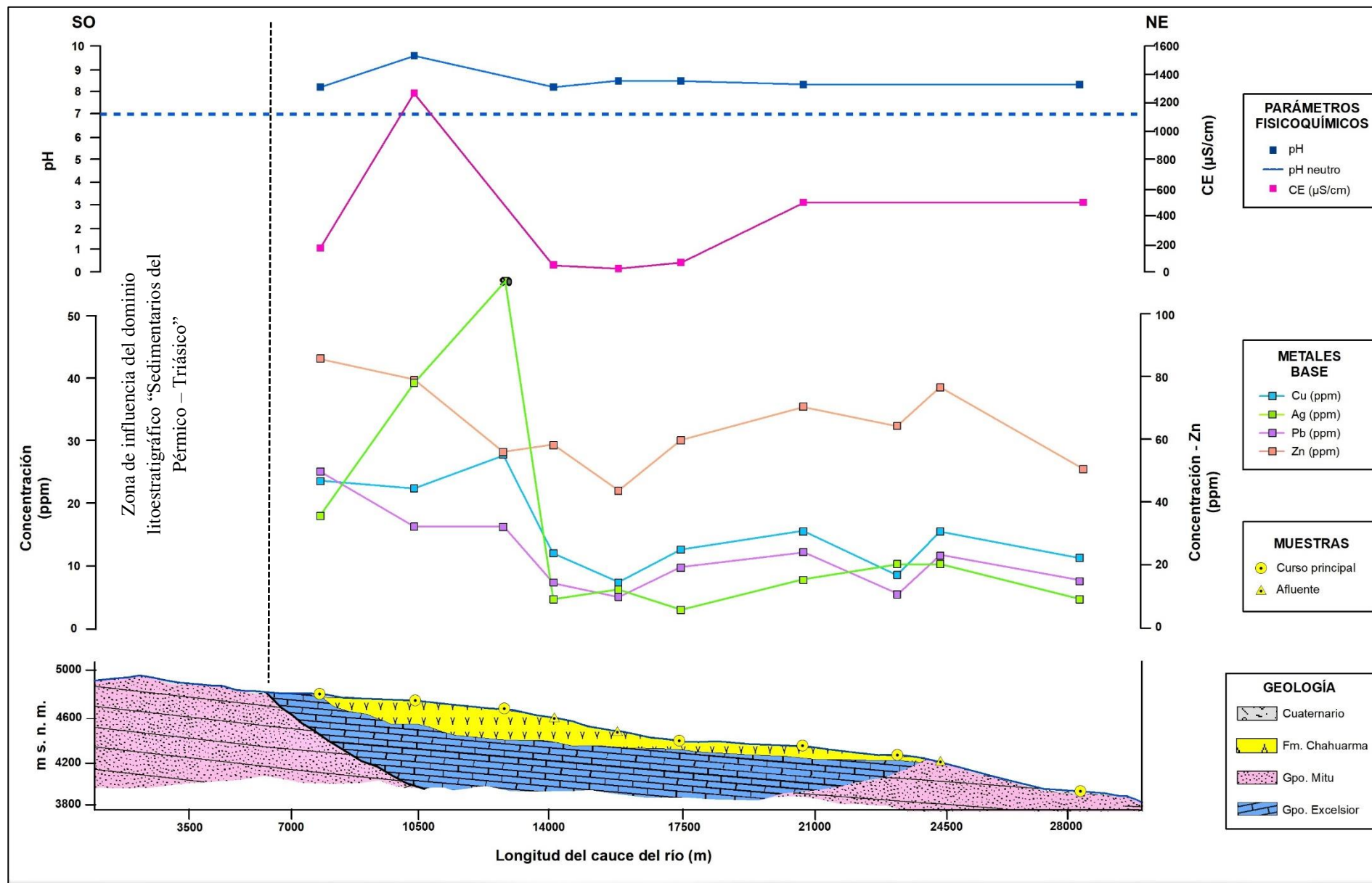


Figura 34. Patrón de dispersión geoquímica secundaria de los metales base – Río Supaymayo.

CAPÍTULO VII: DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE LOS METALES BASE

En este capítulo se describen las distribuciones y anomalías geoquímicas de los metales base presentes en los sedimentos fluviales, teniendo en cuenta los dominios geológicos regionales (poblaciones estadísticas).

Con el fin de determinar anomalías geoquímicas, se realizó el cálculo de umbrales geoquímicos regionales de Plata, Cobre, Plomo y Zinc, según los dominios litoestratigráficos: “Volcánicos del Plioceno” y “Volcánicos del Mioceno” a una escala regional, utilizando el total de muestras recolectadas en los años 2003 y 2016 (tabla 23).

Tabla 23. Numero de muestras utilizadas para el cálculo de los umbrales geoquímicos.

Dominio Litoestratigráfico	No de muestras
Volcánicos del Plioceno	41
Volcánicos del Mioceno	34

Para el cálculo del “*threshold*” o umbral se procedió primero a elaborar los diagramas de caja o box-plot de cada metal base, luego se eliminó los valores que estaban por encima y por debajo del rango intercuartílico, según se explica en “*Geoquímica General y sus Aplicaciones*” de Rivera, 2007. Es así que se determinó el “*background*” o valor de fondo, el cual consiste en la media geométrica de los valores:

$$B = \sqrt[n]{a_1 a_2 \dots a_n}$$

Dónde:

B = Valor de fondo

n = número de datos

a = valores geoquímicos

A partir de ello, se encontró el umbral geoquímico en cada dominio litoestratigráfico (tabla 24), que según Sinclair (1974) responde a la ecuación:

$$U = B + 2D.S.$$

Dónde:

T = Umbral geoquímico

B = background

$D.S.$ = desviación estándar

Tabla 24. Umbrales geoquímicos de los metales base en los dominios litoestratigráficos estudiados.

Dominio Litoestratigráfico	Umbrales regionales			
	Ag	Cu	Pb	Zn
Volcánicos del Mioceno	0.39	39.45	23.96	101.66
Volcánicos del Plioceno	0.23	26.4	41.89	90.66

7.1. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE LA PLATA

En líneas generales la distribución geoquímica de la Plata presenta una focalización de los valores altos al oriente central de la cuenca (ver mapa isovalórico de la Ag, Anexo III).

Tomando como referencia los umbrales geoquímicos regionales de los dominios litoestratigráficos estudiados, se determinó que los sedimentos procedentes de la secuencia volcánicos del Mioceno definen los tenores más altos de Plata. A continuación, se describen las principales anomalías de Plata determinadas en el área de estudio.

Los sedimentos de las secuencias volcánicas del Mioceno reportaron valores de Plata de 0.03 a 0.9 ppm y según el umbral regional se determinaron tres anomalías (tabla 25), siendo la más alta (0.9 ppm) la encontrada en la estación de muestreo HPA-02-143, localizada en el río Supaymayo, localidad de Quicillo (Figura 35).

Por último, en los sedimentos procedentes de las secuencias volcánicas del Plioceno contienen tenores de Plata del orden de los 0.03 ppm hasta los 0.39 ppm. Según el umbral regional (0.23 ppm) se detectaron dos anomalías (tabla 25), siendo la más alta (0.39 ppm) la localizada en la quebrada Supaymayo, localidad de Urayhuana (Figura 35).

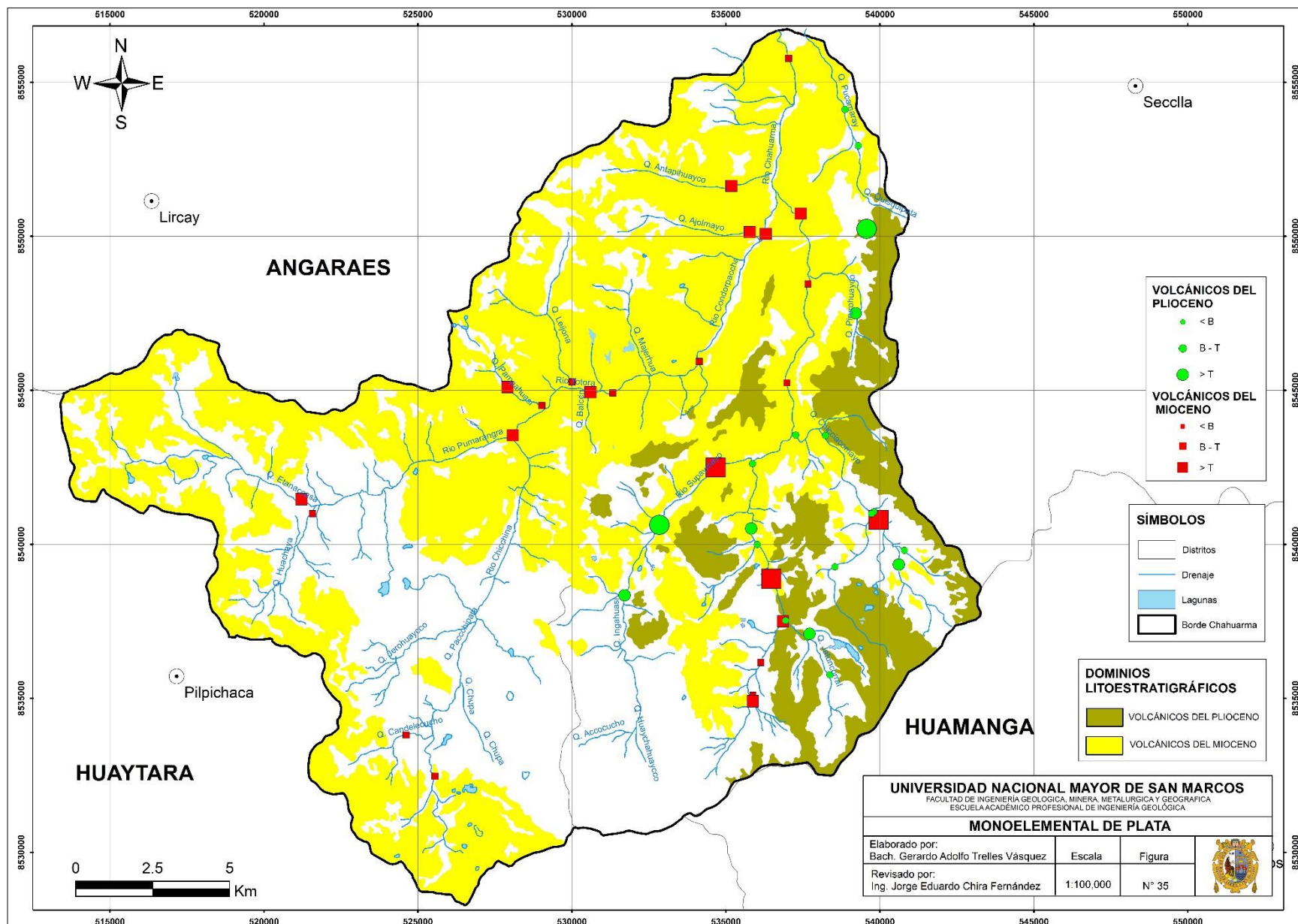


Figura 35. Mapa monoelemental de Plata.

7.2. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DE COBRE

Se observa la mayor concentración de valores altos en la cabecera de cuenca, específicamente en los sectores SO y SE (ver mapa isovalórico del Cu, Anexo III), donde dichos tenores están contenidos en los cursos de los ríos Chicchina y Supamayo (Figura 36).

Por su parte los sedimentos pertenecientes a las secuencias volcánicas del Mioceno reportaron valores de Cobre desde 9.5 ppm hasta 33.7 ppm y al contrastar con el umbral regional (39.45 pm) no se observó anomalías.

Finalmente, las 20 estaciones de muestreo correspondientes a los sedimentos de las secuencias volcánicas del Plioceno, reportaron concentraciones de Cobre en un rango de 8.3 ppm a 24.7 ppm. Sin embargo, de acuerdo al umbral regional (26.4 ppm), no se obtuvieron anomalías geoquímicas.

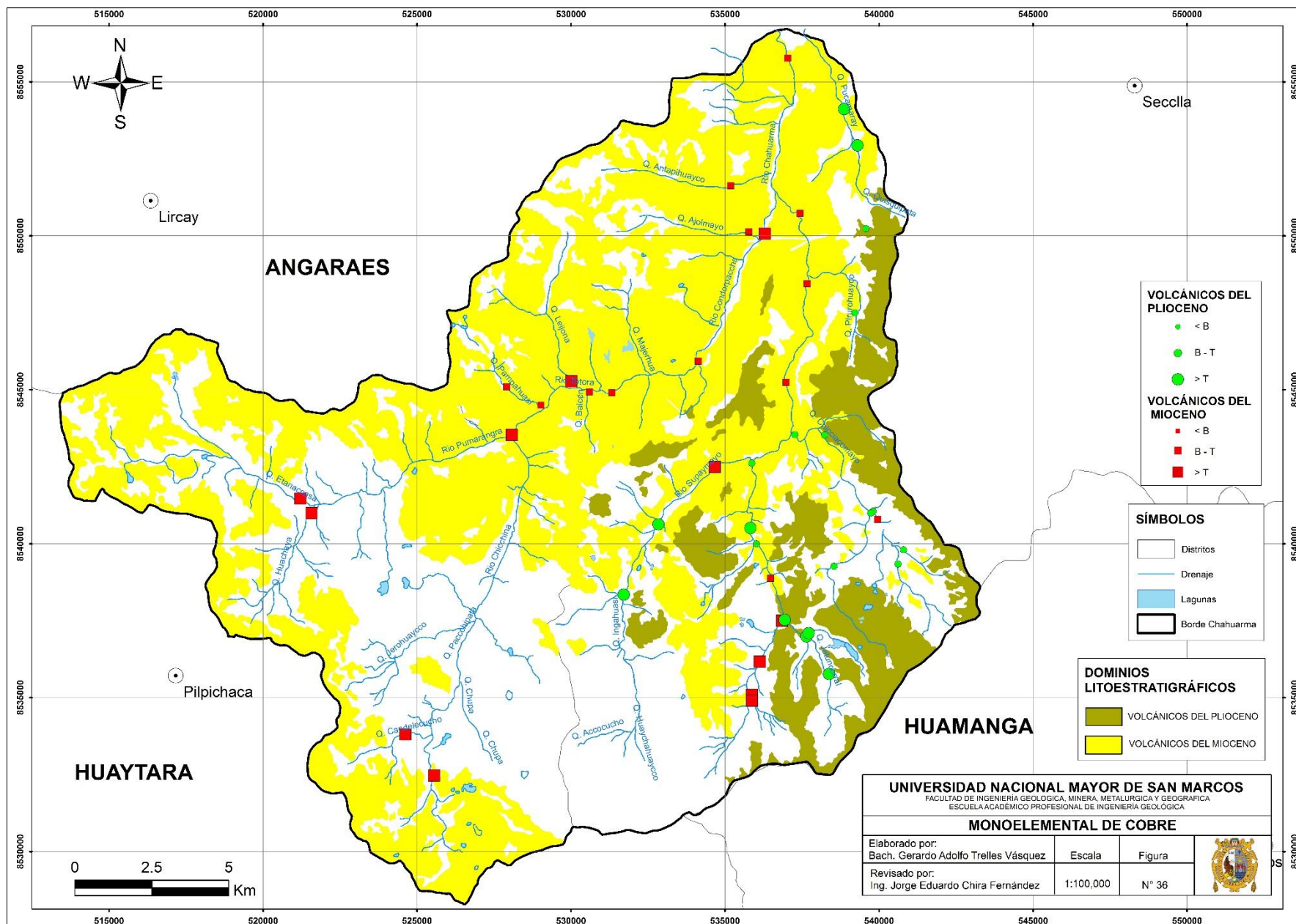


Figura 36. Mapa monoelemental de Cu.

7.3. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL PLOMO

El Plomo por su parte también agrupa los mayores valores en la cabecera de cuenca, exactamente en el sector SE (ver mapa isovalórico del Pb, Anexo III).

Desde un punto de vista general se observó que las muestras extraídas en la cuenca Chahuarma reportaron valores de Plomo entre 4.0 ppm y 53.4 ppm.

En cuanto a los resultados de las abundancias de Plomo en los sedimentos de naturaleza volcánica del Mioceno, se distinguió un intervalo de 4.8 a 17.5 ppm. En consecuencia, según el umbral regional (23.9 ppm) no se logró determinar anomalías geoquímicas.

A diferencia del dominio litoestratigráfico comentado previamente, las secuencias volcánicas del Plioceno si mostraron una anomalía de Plomo (tabla 25), ya que al contrastar con el umbral regional (41.9 ppm), se pudo notar que la muestra 27n-S-032 presento un valor de 53.4 ppm, esta fue extraída en la quebrada Jatuncorral, localidad de Saccapé (Figura 37).

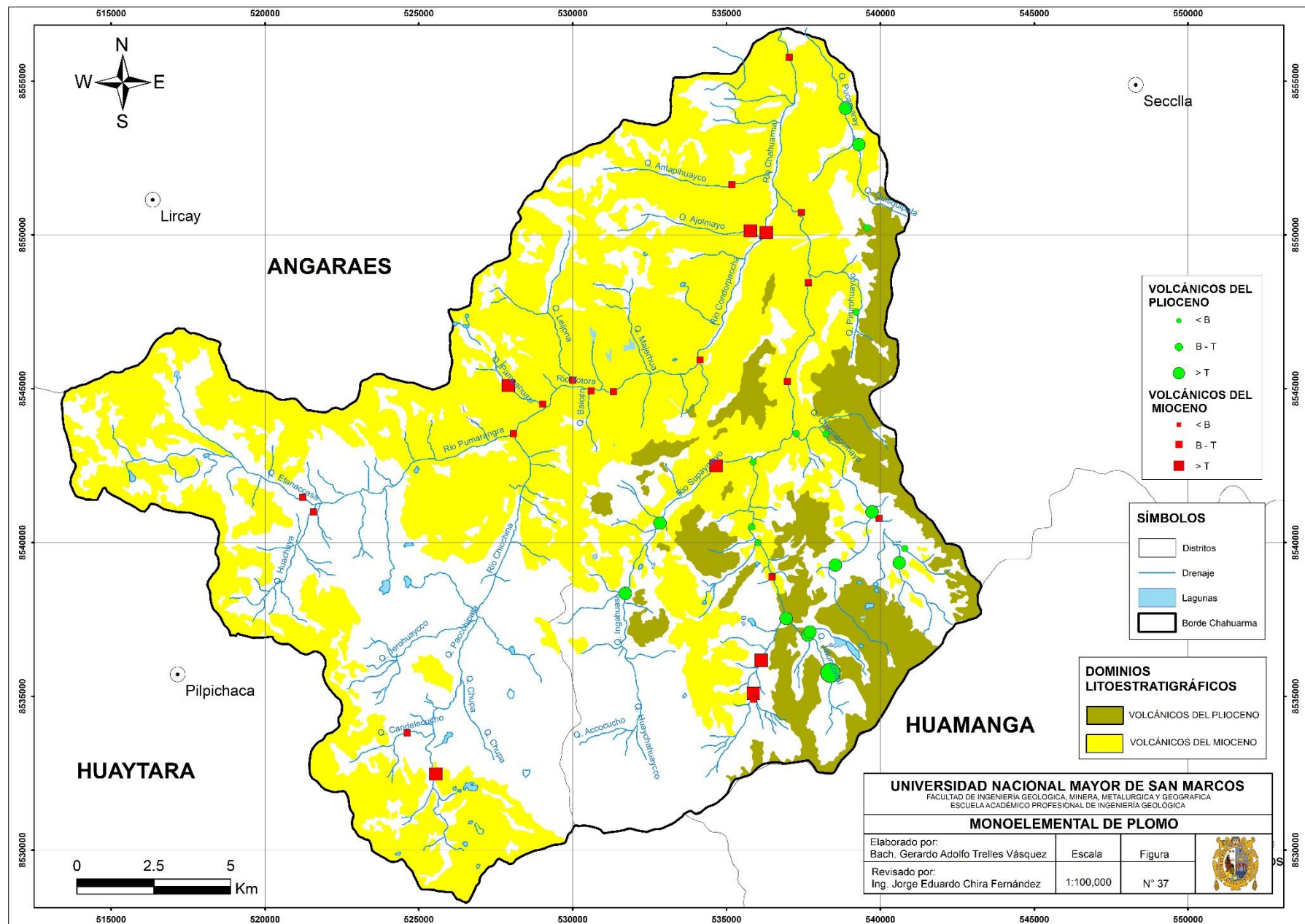


Figura 37. Mapa monoelemental de Pb.

7.4. DISTRIBUCIÓN GEOQUÍMICA DEL ZINC

La distribución geoquímica del Zinc mostro valores altos reunidos en la zona Este de la cabecera de cuenca (ver mapa isovalórico del Zn, Anexo III), tal y como demuestra el mapa monoelemental (Figura 38).

Los contenidos de Zinc de la cuenca Chahuarma se limitaron en un rango de 32.0 a 113.0 ppm.

De otro lado los sedimentos de la secuencia volcánica del Mioceno, reportaron valores de Zinc desde 48.0 ppm hasta 113.0 ppm, lo que según el umbral geoquímico regional (101.6 ppm) denota un valor anómalo (tabla 25), encontrado en la quebrada Pampahuasi, localidad de Ancomarca

Por último, los sedimentos de las secuencias volcánicas del Plioceno, arrojaron valores en un intervalo de 32.0 ppm a 88.0 ppm, no obstante, ningún valor supera el umbral regional de 90.66 ppm, por tal motivo no se encontró anomalías en dicho dominio.

Tabla 25. Anomalías geoquímicas de metales base en la microcuenca Chahuarma.

Id	Anomalía	Código de muestra	Coordenadas		Dominio	Metal(s)	Concentración
			N	E			
1	Urayhuana	27n-S-029	8540633	532837	VP	Ag	0.4
2	Saccape	27n-S-032	8535767	538376	VP	Pb	53.4
3	Quimpe	HPA-02-137	8538883	536475	VM	Ag	0.4
4	Concaracre	HPA-02-138	8550237	539568	VP	Ag	0.3
5	Julian	HPA-02-139	8540795	539957	VM	Ag	0.4
6	Quicello	HPA-02-143	8542496	534660	VM	Ag	0.9
7	Ancomarca	HPA-02-151	8545104	527908	VM	Zn	113.0

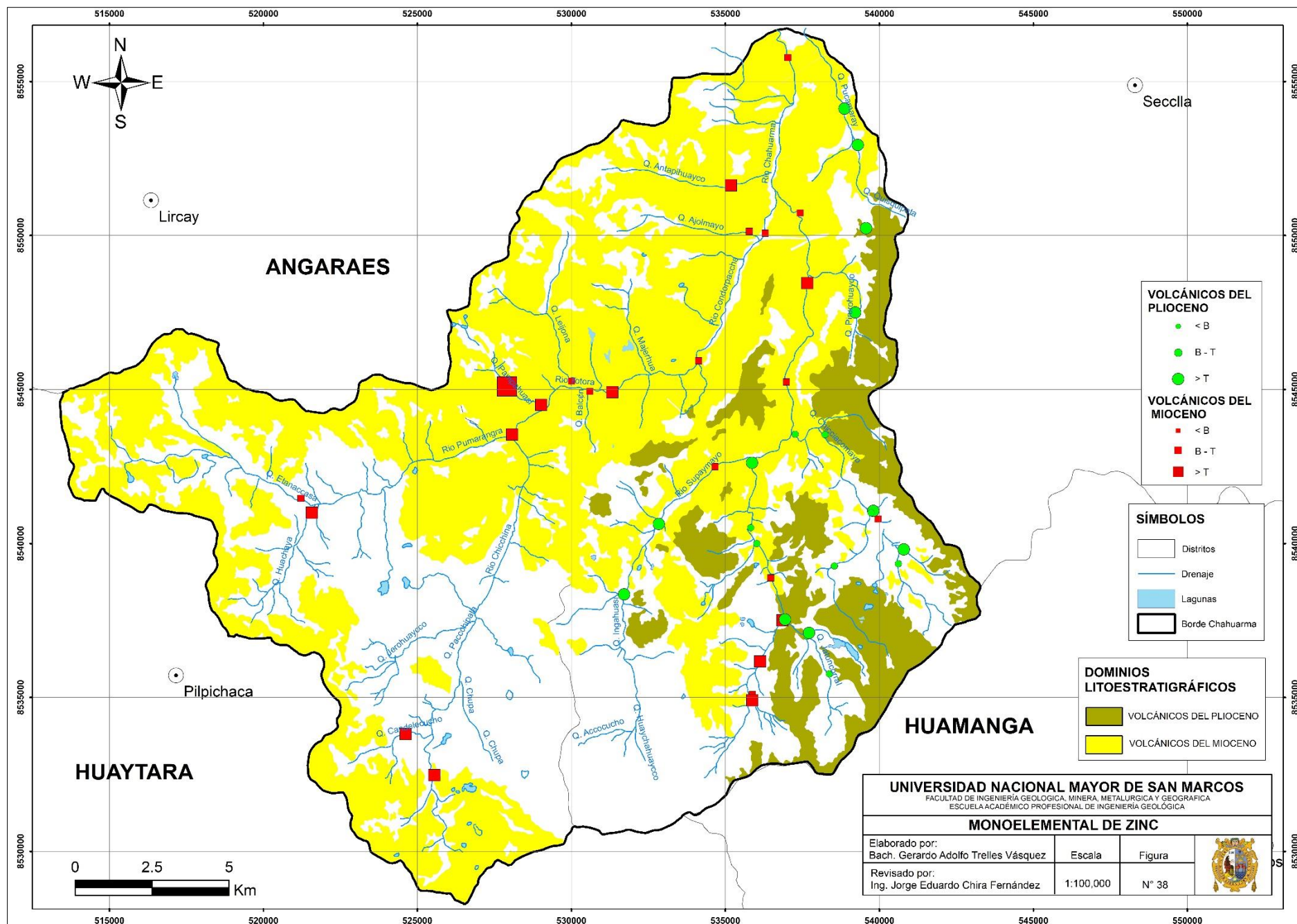


Figura 38. Mapa monoelemental de Zn.
122

CONCLUSIONES

- 1) En general, en el dominio litoestratigráfico Volcánicos del Neógeno, los metales base (Ag-Cu-Pb-Zn) no muestra una distribución estadística normal de acuerdo a los parámetros de normalidad de Kolmogorov – Smirnov – Lilliefors. Sin embargo, al transformar los datos geoquímicos en valores logarítmicos, estos muestran un mayor ajuste a la curva normal. Por lo tanto, se concluye que los metales base son de distribución lognormal en la microcuenca Chahuarma.
- 2) La correlación bivariada muestra que, en los volcánicos del Neógeno, las secuencias volcánicas del Plioceno arrojaron correspondencias geoquímicas con tendencia a filiaciones presentes en yacimientos epitermales de baja sulfuración. Como es el caso de Ag-Sb, el Pb-Hg y Ag-Cu-Zn.
- 3) El análisis multivariado evidencia las siguientes asociaciones geoquímicas para las secuencias volcánicas del Plioceno:
 - Asociación geoquímica 1: Mn – Co – Zn – Y – Ni – Be – Sc.
 - Asociación geoquímica 2: Sr – As – Pb – Sc.
 - Asociación geoquímica 3: Cr – La – Bi – V.
 - Asociación geoquímica 4: Sb – Ag – Hg – Cd.
- 4) Los sedimentos de las secuencias volcánicas del Mioceno, muestran las siguientes asociaciones:
 - Asociación geoquímica 1: Mn – Co – Zn – Y – Ni – Be – Sc.
 - Asociación geoquímica 2: Sr – As – Pb – Sc.
 - Asociación geoquímica 3: Cr – La – Bi – V.
 - Asociación geoquímica 4: Sb – Ag – Hg – Cd.
- 5) El patrón geoquímico observado en la microcuenca Chahuarma, es del tipo clástico – hidromórfico, donde los tres patrones determinados en los principales drenajes comparten

la misma tendencia a concentrar valores altos en la cabecera de cuenca y disminuirse al alejarse de esta. Este hecho se da debido a que en el sector más alto de la cuenca se observan rocas de geología clástico-carbonatada del Pérmico – Triásico que al parecer influyen en la mayor concentración metálica de los sedimentos de este sector.

- 6) La variabilidad geoquímica de los metales base en los volcánicos del Neógeno, se explica mediante la determinación de los parámetros geoquímicos de sus poblaciones (Volcánicos del Plioceno y Volcánicos del Mioceno) y se observó que en cierto modo es constante presentando una varianza conservadora, sin embargo, se identificaron anomalías de Ag, Pb y Zn. Donde los sedimentos de procedencia volcánica del Plioceno evidencian la anomalía más alta de Pb, mientras tanto los sedimentos del volcánico del Mioceno presentaron las anomalías más altas de plata y zinc.

RECOMENDACIONES

- 1) En aras de la investigación y con fines económicos, es importante y necesario caracterizar litogeoquímicamente los afloramientos rocosos presentes en la zona de estudio. Para de esta manera determinar con exactitud las asociaciones geoquímicas de cada litotipo, ya que esto nos indicaría cual es el dominio litoestratigráfico con presencia de mineralización.
- 2) Se recomienda realizar un denso muestreo geoquímico de aguas, para poder establecer relaciones contundentes entre los parámetros fisicoquímicos y las abundancias geoquímicas de los metales base.
- 3) Se sugiere continuar con este estudio en una fase detallada, la cual consistiría en realizar el muestreo de rocas y suelos localizado en las áreas anómalas determinadas en este estudio.
- 4) También se recomienda realizar un cartografiado geológico a escala 1/25,000 para delinear de manera más detallada los límites de las unidades y estructuras geológicas, ya que todo esto orientaría a una óptima identificación de la presencia o ausencia de algún yacimiento metálico.
- 5) Si bien es cierto al contrastar los valores obtenidos en la microcuenca Chahuarma con los valores geoquímicos de yacimientos metálicos conocidos, no se observan tenores interesantes. Sin embargo, no es recomendable interrumpir el estudio de esta área, puesto que no se han agotado todos los métodos exploratorios aplicables para poder descartar económicamente la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arndt, N., Fontboté, L., Hedenquist, J., Kesler, S., Thompson, J., & Wood, D. (2017). Future global mineral resources. *Geochem Perspect* 6, 171 p.
- Audétat, A., & Simon, A. (2012). Magmatic controls on porphyry copper deposits. *Society of Economic Geologist Special Publication* 16, 573-618.
- Brugger, J. (2016). Zinc. En: White W. *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.*
- Carlotto, V., Quispe, J., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., & Mamani, M. (2009). Domios Geotectónicos y Metalogénesis del Perú. *Lima, Perú. Sociedad Geológica del Perú.*
- Chira, J., Ríos, C., Trelles, G., & Villarreal, E. (2018). Estimación del potencial minero metálico del Perú y su contribución económica al Estado, acumulado al 2050. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Lima, Perú.*
- Chira, J., Vargas, L., De La Cruz, C., Pascual, O., Perez, V., & Aguilar, P. (2018). Atlas Geoquímico del Perú. 2da Edición. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.*
- De La Fuente, S. (2011). Componentes Principales ACP. *Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.*
- Dickinson, J., & Chakroborti, S. (2003). Nonparametric Statistical Inference. *Nueva York, EE.UU.: Editorial Marcel Dekker, Cuarta Edición.*
- Faure, G. (1991). Principles and Applications of Geochemistry. *Nueva York, EE.UU.: Prentice Hall. 2da edición.*
- Goldschmidt, V. (1937). Geochemical distribution of the elements, the proportions and the atomic species. *Oslo, Noruega.*
- Gorgas, J., Cardiel, N., & Zamorano, J. (2011). Estadística básica para estudiantes de ciencias. *Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.*
- Injoque, J., Valdivia, J., & García, L. (1994). Geología del distrito minero de Huachocolpa. *Lima, Perú: VIII Congreso de Geología. Resúmenes Extendidos*, 10-15.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2005). Procedimiento de Prospección Geoquímica de Sedimentos de Corriente. Protocolo interno. *Lima, Perú: Dirección de Recursos Minerales y Energéticos.*
- Kaiser, H. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, N° 23, 187-278.

- Kyser , K., Barr, J., & Ihlenfeld, C. (2015). Applied geochemistry in mineral exploration and mining. . *Elements 11*, 241-246.
- Liu, X., & Xiong , X. (2016). Copper. En: White . *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.*
- McKee, E., Noble , D., Petersen, U., Arenas , M., & Benavides , A. (1975). Chronology of late Tertiary volcanismo and mineralization, Huachocolpa district, central Peru. *Colorado, EE.UU.: Society of Economic Geologist*, 388-390.
- McQueen, K. (2008). Identifying Geochemical Anomalies . *Camberra - Australia. Departmend of Earth and Marine Sciences, Australian National University.*
- Megahan, W. (1999). Sediment, sedimentation. En: *Environmental Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht.*
- Mégard , F. (1984). The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru. *London, England: Journal of Geological Society of London*, 893-900.
- Morche , W., La Torre , O., De La Cruz, N., & Cerrón , F. (1996). Geología del Cuadrángulo de Huachocolpa. *Boletín N° 63 serie A: Carta Geológica Nacional. Lima, Perú. Instituto Geológico Minero y Metaúrgico .*
- Murphy , M., & Salvador , A. (1999). International Stratigraphic Guide - an abridged version. *International Subcommission on Stratigraphic Classification of IUGS International Commission on Stratigraphy. Episodes 255, Vol. 1 , 255 - 271.*
- Noble , D., McKee, E., Farrar, E., & Petersen , U. (1974). Episodic Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of Peru. *EE.UU.: Earth and Planetary Science Letters*, 213-220.
- Noble , D., Petersen, U., Mckee, E., Arenas , F., & Benavides , A. (1972). Cenozoic volcano - tectonic evolution of the Julcani-Huachocolpa-Castrovirreyna area, central Peru. *Geological Survey of America. Abstracts with programs 4. EE.UU.*
- Noble , D., Silberman , M., Mégard , F., & Bowman , H. (1978). Comendite (peralkaline rhyolite) and basalt in the Mitu Group, Perú: Evidence for Permian - Triassic litospheric extension in the Central Andes . *Virginia EE.UU.: Journal of Research. United States Geological Survey*, 453-457.
- Orellana , L. (2001). Estadística descriptiva . *Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires .*
- Perel'man , A. (1986). Geochemical Barriers. *Nueva York, EE.UU: Plenum.*
- Perel'man, A. (1967). Geochemistry of Epigenesis. *Nueva York, EE.UU: Plenum.*

- Pérez-Puig, C., & Yparraquirre, J. (2013). El distrito polimetálico de Huachocolpa (Huancavelica - Perú). *Lima, Perú: Revista Iberica de Mineralogia*.
- Plá, R. (2003). Evaluación estadística de una matriz de datos utilizando el SPSS. *ALCA. Asunción, Paraguay: Curso Regional Validaciones de Metodologías Analíticas y Métodos Específicos*.
- Rankama, K., & Sahama, T. (1962). *Geoquímica*. Madrid - España : Aguilar ediciones.
- Rivera H. (2007). *Introducción a la Geoquímica General y Aplicada. 2da Edición* . Lima, Perú: Gráfica Retari S.A.C.
- Siegel, F. (1992). *Geoquímica Aplicada*. Washington, EE.UU : Secretaría General de la OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- Thompson, J. (2017). Geochemical Exploration. *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham*.
- Valdivia, E., & Raymundo, T. (2003). Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Huachocolpa (27-n) a escala 1:50, 000. *Lima, Perú*.
- Vargas, L., Chira, J., & Chero, R. (2008). Caracterización de la dispersión y distribución geoquímica del Hf, Nb, Ni, Zr y V en sedimentos activos de la cuenca Huaral-Lima. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima, Perú*.
- Vasallo, L. (2008). *Yacimientos Minerales Metálicos*. Querétaro, México: 4ta edición. Centro de Geociencias Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vásquez, R. (2003). *Análisis textural y petrográfico de las ignimbritas de la Formación Chahuarma*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Viladevall, M. (2008). *La Prospección Geoquímica*. Barcelona, España: 1era edición. Facultad de Geología, Universidad de Barcelona.
- Weis, D. (2016). Lead. *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham*.
- White, W. (2003). *Geochemistry*. Maryland, EE.UU: John - Hopkins University.

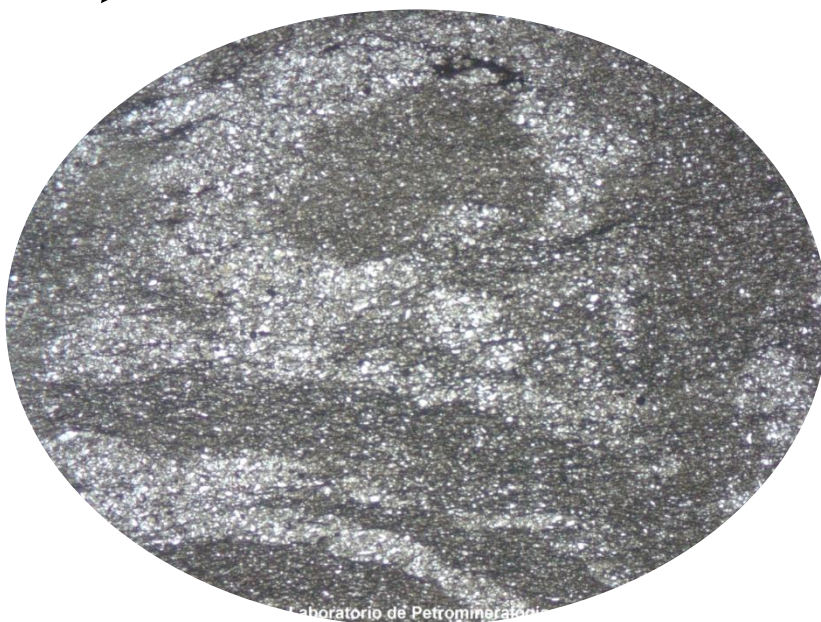
ANEXO I
ESTUDIOS PETROGRÁFICOS

MUESTRA 27n-R-054a: LIMOLITA



MACRO

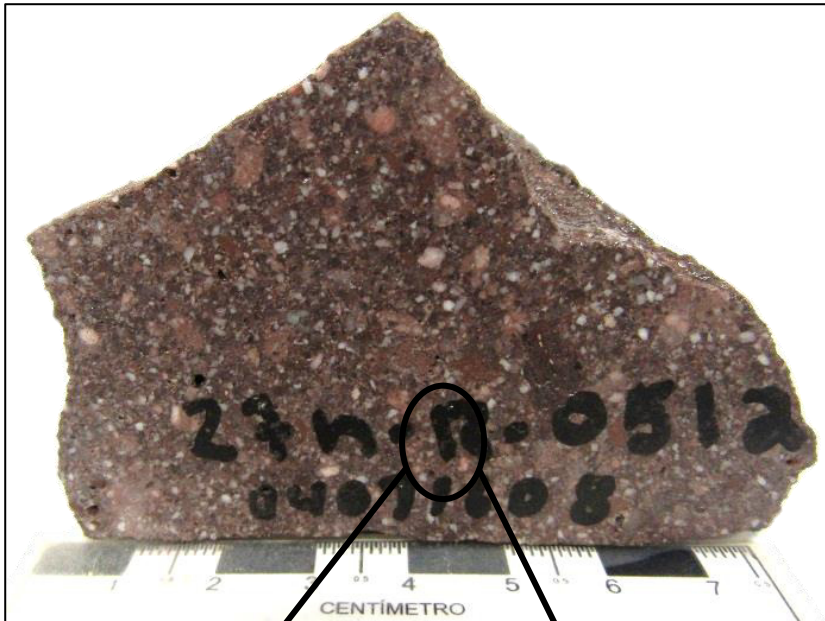
Roca sedimentaria compacta de color gris oscuro, con textura clástica, de granulometría fina. Compuesta por granos de cuarzo y micas, presenta laminación subparalela, además de algunas fracturas rellenas por óxidos. Presenta densidad y dureza media.



MICRO

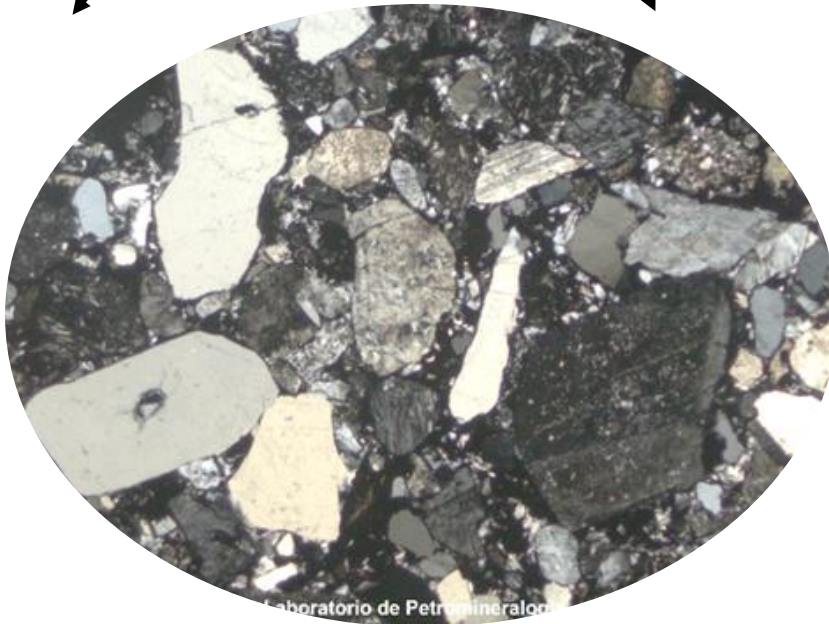
Granos de cuarzo subangulosos: cz, dispuestos en una matriz conformada por arcillas: ARCs, y cemento de micas y cloritas: MCs-CLOs, además se observa laminaciones de materia orgánica y óxidos: Mt.Org-OXs

MUESTRA 27n-R-051a: ARENISCA VOLCANOCLÁSTICA



MACRO

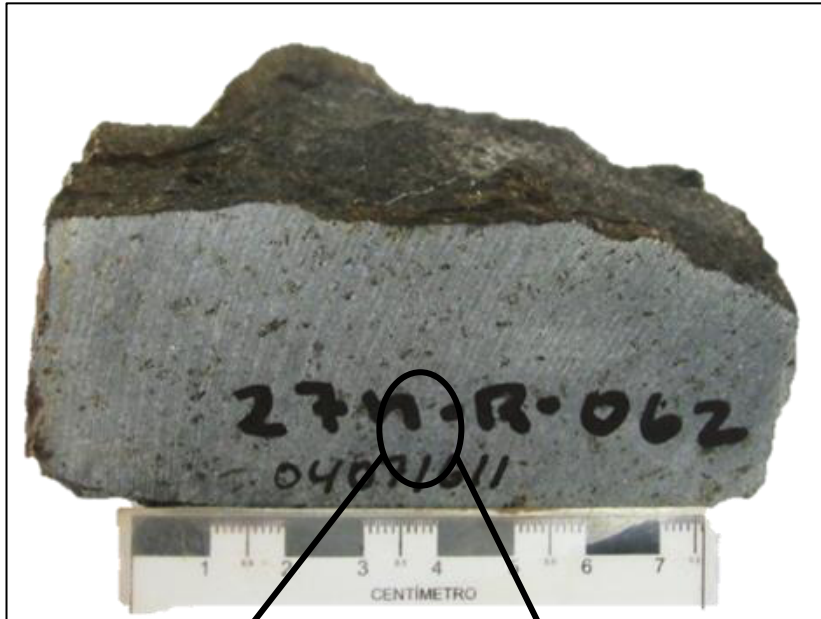
Roca de naturaleza sedimentaria, compacta, de color pardo rojizo, con textura clástica pobremente clasificada; conformada por granos de plagioclasas, feldespatos, cuarzo y fragmentos líticos inmersos en una matriz conformada por óxidos. La muestra presenta densidad y dureza media.



MICRO

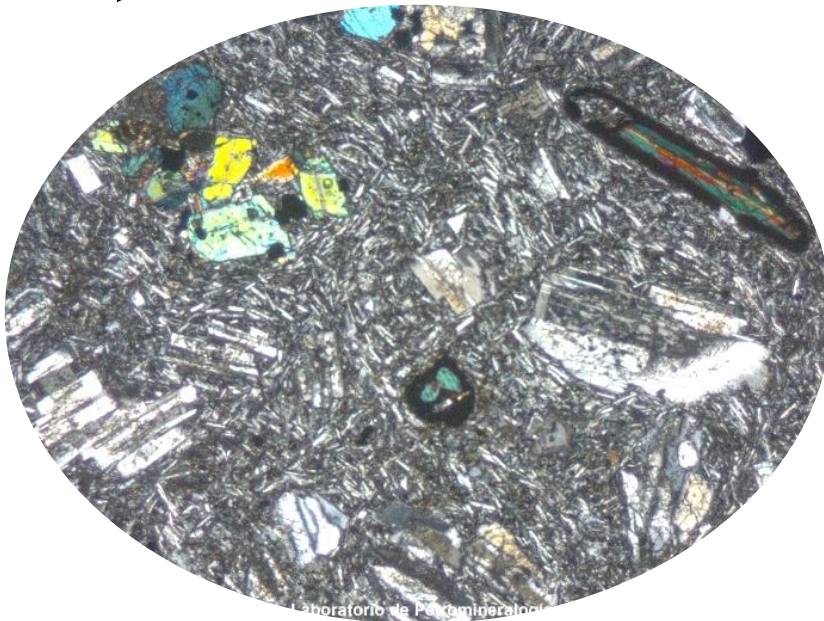
Roca sedimentaria clástica con textura grano soportada pobremente clasificada; conformada por clastos de cuarzo monocristalino y policristalino, plagioclasas, feldespatos potásicos, fragmentos líticos de variada naturaleza; además de micas y epidota, cementados por óxidos cuarzo, plagioclasas y carbonatos. La muestra está alterada a arcillas, cloritas y sericita.

MUESTRA 27n-R-062: ANDESITA



MACRO

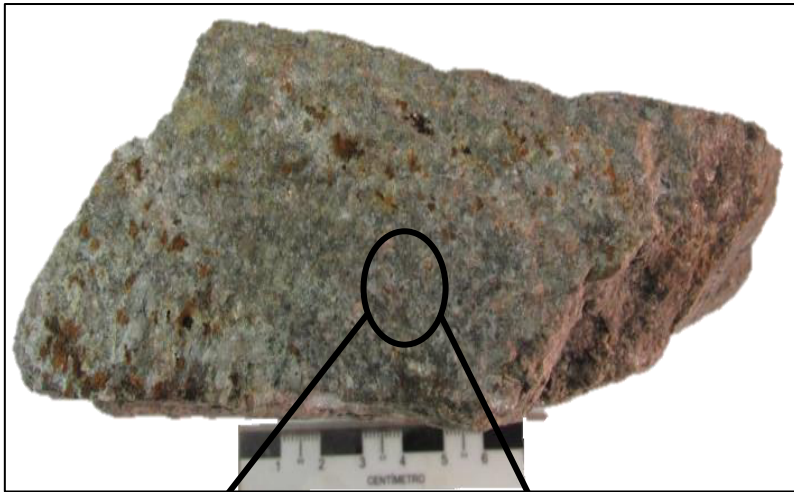
Roca ígnea volcánica, compacta de color gris oscuro de tonalidad verdosa, con textura porfirítica. Se encuentra conformada por cristales de plagioclasas y anfíboles; dispuestos en una matriz afanítica. La muestra presenta densidad alta, dureza media, con magnetismo débil.



MICRO

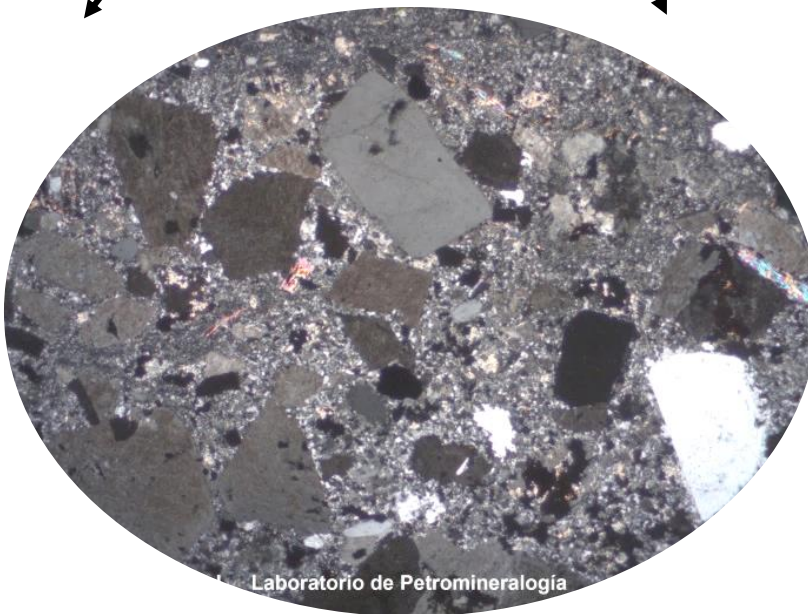
Roca ígnea volcánica de textura porfirítica. Se encuentra constituida por cristales de plagioclasas, piroxenos y anfíboles, además de minerales opacos y apatito; distribuidos en una matriz traquítica conformada por microcristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos. La alteración está dada por arcillas, cloritas, óxidos y opacita.

MUESTRA 27n-R-025: RIOLITA PORFIRÍTICA



MACRO

Roca ígnea volcánica compacta de color gris rosáceo y textura porfirítica. La muestra está compuesta por cristales de feldespatos potásicos, cuarzo, plagioclasas y algunos ferromagnesianos; en una matriz afanítica.



MICRO

Roca ígnea volcánica con textura porfirítica, conformada por cristales de feldespatos potásicos, cuarzo y plagioclasas; además moldes de posibles cristales y ferromagnesianos reemplazados por sericita y moscovita respectivamente, además de minerales opacos diseminados; en matriz de feldespatos potásicos, plagioclasas y cuarzo, remplazada por agregados de cristales de cuarzo II.

ANEXO II

BASE DE DATOS DE LA GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS

Tabla A.2.1. Resultados geoquímicos del análisis de sedimentos de corriente en la microcuenca Chahuarma.

N°	Muestra	Unidad aporte	Litotipo predom	Dominio	Norte	Este	Al	Ca	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Sr	Ti	V	Zn	Zr	Ag	As	Be	Bi	Cd	Co	Hg	La	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Sn	W	Y
1	27n-S-004	Chahuarma	Toba	VM	8548453	537663	1.27	0.89	24.00	16.20	2.37	0.20	0.50	594.00	0.04	882.00	68.00	0.13	48.00	73.00	6.00	0.08	76.00	0.70	0.23	0.17	9.10	0.09	14.40	0.73	12.30	11.40	0.99	4.20	0.90	0.10	7.62
2	27n-S-017	Chahuarma	Toba	VM	8545243	536980	0.97	0.79	18.00	12.60	1.97	0.19	0.46	465.00	0.04	655.00	55.00	0.11	38.00	59.00	6.00	0.03	61.00	0.60	0.18	0.12	7.00	0.08	11.50	0.98	9.60	9.00	0.91	3.40	0.90	0.10	5.63
3	27n-S-028	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8533812	524617	2.39	1.58	48.00	33.70	3.62	0.16	1.39	925.00	0.03	1455.00	144.50	0.05	69.00	75.00	10.60	0.04	12.00	1.70	0.19	0.12	19.60	0.06	20.50	0.63	34.70	10.00	0.24	9.30	0.90	0.05	12.10
4	27n-S-030	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8535096	535875	1.40	0.24	46.00	19.90	2.59	0.07	0.16	289.00	0.03	828.00	155.80	0.17	71.00	58.00	15.00	0.04	65.00	0.80	0.57	0.10	9.50	0.05	25.00	1.24	11.60	13.00	1.00	5.40	0.90	0.05	7.03
5	27n-S-038	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8532474	525549	1.79	0.34	25.00	24.10	5.03	0.14	0.73	766.00	0.01	1132.00	42.60	0.01	41.00	101.00	1.00	0.09	86.00	1.70	2.58	0.19	22.80	0.05	17.10	3.90	16.40	17.50	1.43	2.80	0.70	0.05	6.21
6	27n-S-040	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8536168	536135	1.71	1.64	51.00	27.00	3.57	0.10	0.73	886.00	0.06	1703.00	109.40	0.12	78.00	88.00	9.70	0.07	98.00	1.30	0.25	0.19	17.90	0.04	24.30	0.93	36.40	13.30	1.29	7.50	0.80	0.10	13.00
7	27n-S-042	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8537497	536854	1.78	0.68	63.00	26.00	3.08	0.08	0.29	582.00	0.03	908.00	135.60	0.19	83.00	77.00	21.70	0.22	43.00	1.00	0.37	0.11	13.20	0.03	26.50	0.71	23.50	12.00	1.03	7.30	1.00	0.05	9.61
8	27n-S-046	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8534902	535873	1.67	3.22	46.00	33.70	3.67	0.11	0.92	1203.00	0.07	1867.00	125.80	0.11	75.00	87.00	13.60	0.26	102.00	1.00	0.21	0.20	18.90	0.02	23.60	0.99	40.60	12.20	2.16	7.20	0.80	0.10	13.30
9	27n-S-051	Chahuarma	Toba	VM	8555779	537030	0.88	0.74	27.00	11.30	1.96	0.16	0.34	427.00	0.06	671.00	50.80	0.11	35.00	50.00	10.60	0.05	39.00	0.60	0.15	0.07	6.80	0.14	12.10	3.12	9.60	7.40	0.56	3.00	0.80	0.10	5.33
10	27n-S-052	Chahuarma	Toba	VM	8545274	530000	1.45	0.39	28.00	26.20	2.87	0.11	0.46	412.00	0.04	1090.00	48.20	0.16	61.00	66.00	10.20	0.09	20.00	0.60	1.36	0.08	9.00	0.05	20.50	1.04	10.70	10.20	1.71	2.90	0.80	0.20	6.52
11	27n-S-055	Chahuarma	Andesita	VM	8545931	534131	1.00	1.15	22.00	10.90	2.02	0.14	0.35	477.00	0.06	753.00	61.80	0.09	34.00	51.00	6.00	0.05	30.00	0.60	0.19	0.08	7.60	0.27	14.70	2.07	10.70	8.70	0.59	3.10	0.70	0.10	6.17
12	27n-S-061	Chahuarma	Toba	VM	8550077	536297	1.07	2.42	24.00	22.90	2.59	0.11	0.46	611.00	0.05	1116.00	86.80	0.09	48.00	66.00	8.60	0.16	48.00	0.80	0.28	0.11	11.10	1.05	17.10	0.91	18.50	14.30	1.50	4.30	1.00	0.10	8.51
13	27n-S-062	Chahuarma	Andesita	VM	8544910	531329	1.09	2.27	28.00	16.50	3.06	0.12	0.56	707.00	0.06	1111.00	89.40	0.09	50.00	68.00	12.70	0.03	54.00	1.00	0.35	0.11	13.50	0.76	17.30	1.66	20.60	10.30	0.64	4.30	0.70	0.10	8.18
14	27n-S-063	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8540993	521573	1.06	1.92	42.00	30.60	4.57	0.07	0.63	1333.00	0.07	2919.00	101.30	0.06	64.00	72.00	14.60	0.09	31.00	1.70	0.11	0.13	27.40	0.01	32.80	0.93	64.70	4.80	0.98	10.10	0.60	0.05	16.50
15	27n-S-064	Chahuarma	Andesita	VM	8543540	528076	1.01	0.64	25.00	19.00	3.05	0.12	0.32	766.00	0.06	1267.00	66.10	0.10	53.00	78.00	13.00	0.16	35.00	0.90	0.16	0.08	14.30	0.06	19.30	1.02	19.20	9.80	0.61	4.90	0.80	0.10	9.17
16	27n-S-066	Chahuarma	Toba	VM	8544503	529019	1.55	0.57	32.00	18.20	2.52	0.17	0.32	531.00	0.08	1034.00	85.90	0.24	65.00	70.00	21.60	0.07	9.00	0.60	0.19	0.07	10.60	0.02	20.60	1.15	10.60	10.70	0.45	3.30	0.90	0.20	7.73
17	27n-S-073	Chahuarma	Toba	VM	8544935	530602	1.29	0.52	8.00	13.70	2.24	0.12	0.17	643.00	0.06	869.00	105.70	0.04	32.00	48.00	4.70	0.13	56.00	1.10	0.28	0.13	7.70	3.12	19.60	1.19	4.10	12.10	1.29	3.60	0.70	0.05	9.43
18	27n-S-075	Fm. Apacheta	Andesita	VM	8541468	521217	0.88	0.50	18.00	18.90	2.58	0.12	0.31	849.00	0.05	1200.00	62.90	0.04	35.00	63.00	2.60	0.16	67.00	0.80	0.26	0.09	11.80	0.18	20.40	1.28	14.70	11.90	2.81	3.90	0.70	0.10	7.90
19	HPA-02-151	Chahuarma	S.I.	VM	8545104	527908	0.87	0.28	96.00	10.50	3.76	0.25	0.22	469.00	0.07	900.00	27.40	0.22	109.00	113.00	12.40	0.30	4.00	0.40	4.00	0.90	6.00	0.09	27.30	0.90	8.00	13.00	4.00	2.90	0.90	2.20	6.20
20	HPA-02-139	Chahuarma	S.I.	VM	8540795	539957	0.86	0.29	127.00	10.60	2.55	0.13	0.49	374.00	0.05	800.00	16.90	0.21	76.00	60.90	6.30	0.40	3.00	0.40	4.00	0.90	6.00	0.09	33.70	0.90	12.00	12.00	4.00	2.90	0.90	0.90	5.10
21	HPA-02-143	Chahuarma	S.I.	VM	8542496	534660	0.94	0.11	218.00	28.10	2.71	0.20	0.42	538.00	0.01	300.00	4.30	0.01	30.00	55.50	1.60	0.90	25.00	0.60	4.00	0.90	10.00	0.09	24.40	0.90	19.00	17.00	4.00	1.90	0.90	1.20	7.00
22	HPA-02-037	Chahuarma	S.I.	VM	8550133	535776	0.96	1.06	54.00	10.60	2.91	0.16	0.35	455.00	0.09	800.00	54.80	0.13	77.00	66.50	8.30	0.10	21.00	0.40	4.00	0.90	8.00	0.39	14.60	1.00	14.00	13.00	4.00	2.60	0.90	0.90	6.30
23	HPA-02-038	Chahuarma	S.I.	VM	8550734	537426	0.72	0.66	84.00	9.50	2.70	0.18	0.32	328.00	0.08	800.00	41.90	0.16	83.00	66.10	8.50	0.10	28.00	0.40	4.00	0.90	6.00	0.63	17.30	0.90	11.00	5.00	4.00	2.30	0.90	0.90	5.80
24	HPA-02-039	Chahuarma	S.I.	VM	8551634	535176	1.00	0.42	126.00	16.00	3.99	0.08	0.73	428.00	0.09	900.00	39.80	0.32	158.00	77.30	19.40	0.10	2.00	0.40	4.00	0.90	16.00	0.06	13.70	0.90	34.00	11.00	4.00	2.40	0.90	0.90	4.90
25	HPA-02-137	Chahuarma	S.I.	VM	8538883	536475	1.05	0.28	136.00	10.70	2.40	0.16	0.55	395.00	0.06	800.00	19.10	0.20	68.00	59.30	5.10	0.40	4.00	0.40	4.00	0.90	7.00	0.09	24.90	1.00	12.00	11.00	4.00	2.90	0.90	0.90	5.00
26	27n-S-006	Fm. Portuguesa	Toba Dacítica	VP	8543532	538231	0.66	0.12	14.00	9.30	1.12	0.22	0.30	158.00	0.04	341.00	22.70	0.13	24.00	43.00	4.10	0.07	5.00	0.20	0.14	0.07	3.10	0.01	7.20	1.63	3.20	5.80	0.76	1.90	0.70	0.10	2.15
27	27n-S-010	Fm. Portuguesa	Flujo Piroclástico	VP	8539273	538536	0.72	0.11	34.00	11.00	2.27	0.17	0.16	101.00	0.02	941.00	147.80	0.09	41.00	34.00	4.40	0.03	106.00	0.70	0.23	0.08	2.40	0.02	17.00	3.35	3.50	33.30	0.60	3.00	0.80	0.30	2.85
28	27n-S-010a	Fm. Portuguesa	Andesita	VP	8541058	539799	1.00	0.22	30.00	12.20	1.74	0.12	0.52	268.00	0.03	456.00	35.50	0.20	41.00	57.00	7.10	0.07	14.00	0.50	0.13	0.06	6.40	0.02	10.70	1.07	9.30	11.90	0.90	3.30	1.60	0.05	2.94
29	27n-S-011	Fm. Portuguesa	Toba Lapilli	VP	8539806	540789	1.20	0.27	30.00	10.90	1.83	0.18	0.69	289.00	0.03	641.00	23.60	0.20	40.00	63.00	5.10	0.04	11.00	0.50	0.12	0.07	7.20	0.02	10.70	2.84	10.30	10.10	0.37	3.70	0.80	0.05	4.21
30	27n-S-016	Fm. Portuguesa	Andesita	VP	8541000	539726	0.83	0.13	27.00	10.40	1.80	0.24	0.26	152.00	0.03	681.00	115.10	0.13	37.00	45.00	5.90	0.07	54.00	0.30	0.18	0.04	3.30	0.03	13.90	2.17	3.70	16.30	0.72	2.80	1.00	0.20	2.56
31	27n-S-020	Fm. Portuguesa	Toba Dacítica	VP	8543545	537265	0.76	0.13	38.00	8.30	1.48	0.24	0.30	196.00	0.04	418.00	23.30	0.13	29.00	45.00	3.20	0.06	7.00	0.30	0.11	0.02	3.40	0.01	7.90	6.70	4.00	4.70	0.26	2.00	0.80	0.10	2.61
32	27n-S-022	Fm. Portuguesa	Toba Lapilli	VP	8539344	540613	0.73	0.16	77.00	12.50	1.87	0.07	0.13	151.00	0.02	730.00	83.30	0.14	59.00	32.00	4.40	0.09	26.00	0.40	0.15	0.02	4.40	0.04	20.00	4.38	8.90	14.80	0.60	2.80	1.00	0.40	3.47
33	27n-S-025	Fm. Portuguesa	Toba Dacítica	VP	8554121	538863	1.89	0.25	45.00	19.90	2.78	0.09	0.15	914.00	0.03	681.00	50.60	0.21	76.00	85.00	18.50	0.07	64.00	1.30	0.29	0.16	13.60	0.05	21.10	1.65	12.00	20.40	0.74	4.70	1.10	0.20	8.37
34	27n-S-027	Fm. Portuguesa	Andesita	VP	8537527	536939	1.36	0.26	55.00	19.10	2.77	0.07	0																								

ANEXO III

**MAPAS ISOVALÓRICOS DE LOS METALES BASE EN LA MICROCUENCA
CHAHUARMA**

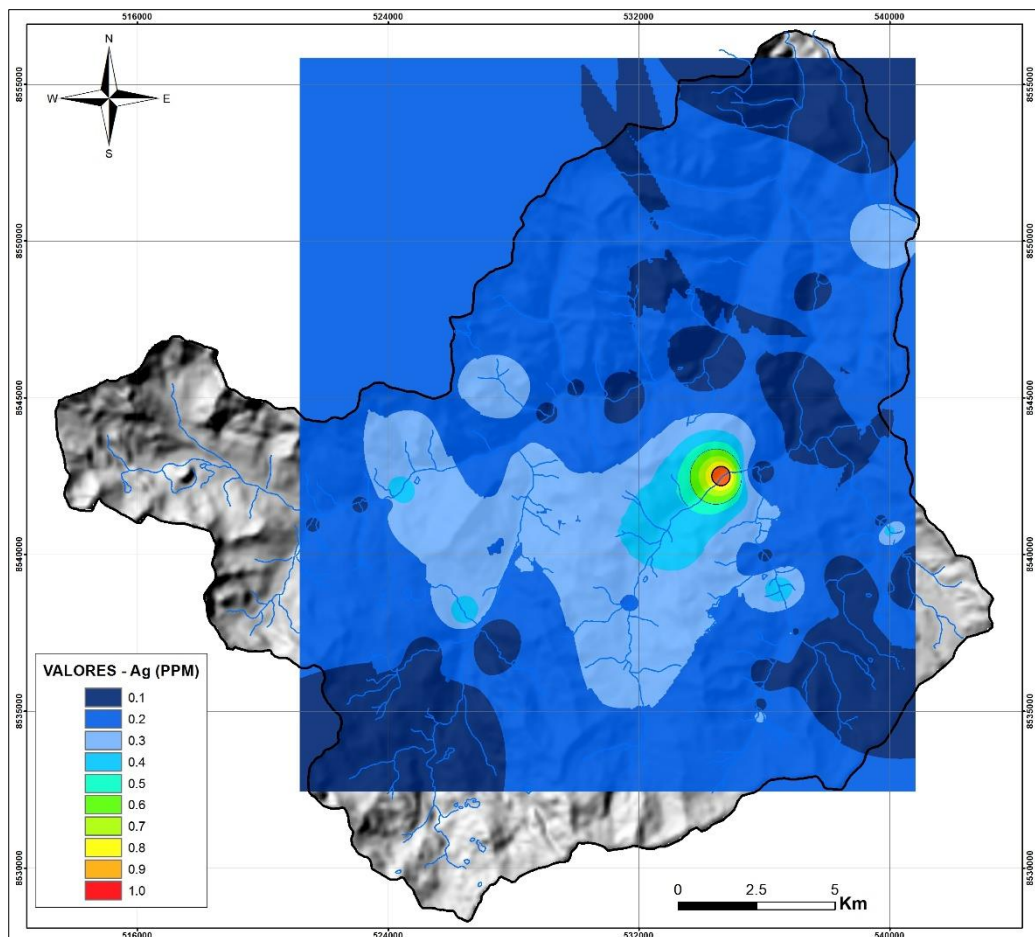


Figura A.3.1. Mapa isovalórico de Ag en la microcuenca Chahuarma.

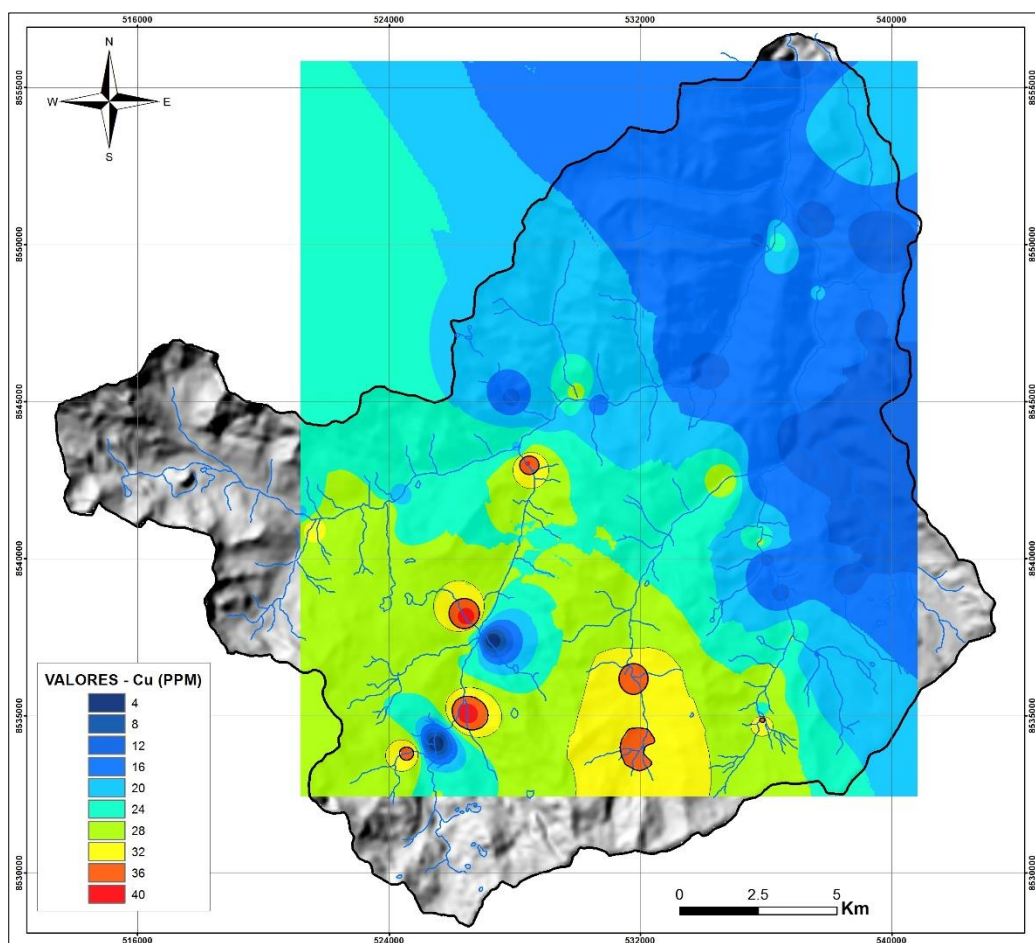


Figura A.3.2. Mapa isovalórico de Cu en la microcuenca Chahuarma.

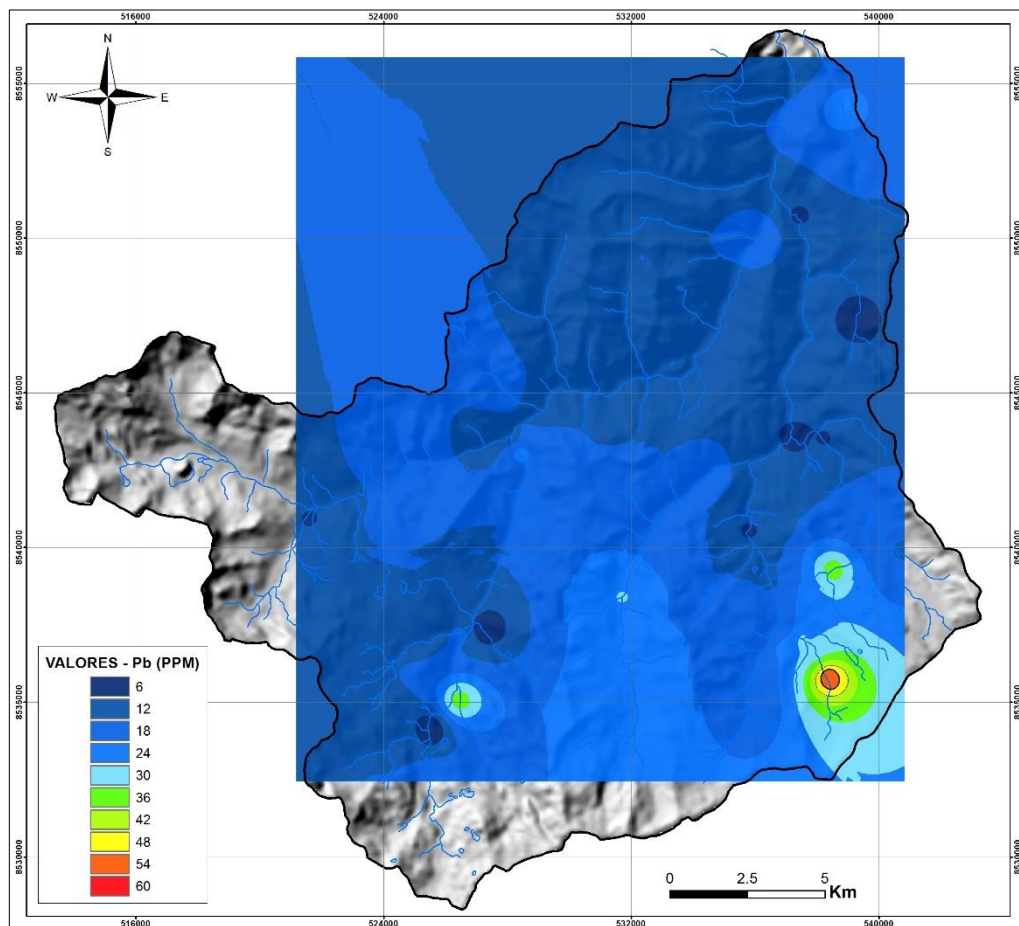


Figura A.3.3. Mapa isovalórico de Pb en la microcuenca Chahuarma.

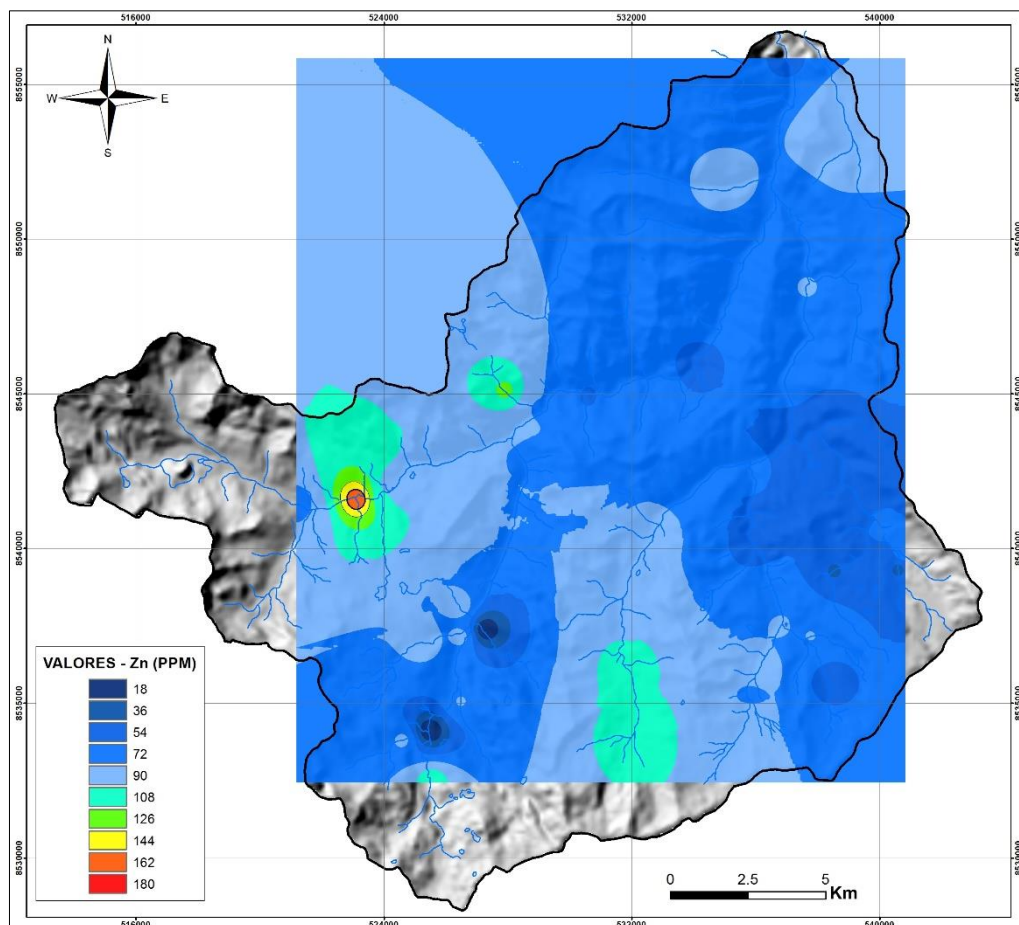


Figura A.3.4. Mapa isovalórico de Zn en la microcuenca Chahuarma.